



NextFEM Designer

Manuale di validazione delle verifiche

Versione 2.4

© NextFEM 2015-2024

Indice

Capitolo 1 Introduzione	5
Riferimenti normativi	5
Capitolo 2 Validazione del calcolo	6
Tipo di analisi svolta	7
Analisi statiche	7
Origine e caratteristiche dei codici di calcolo	8
Affidabilità e validazione dei codici	9
Caso 1	9
Caso 2	16
Caso 2a	16
Caso 2b	22
Caso 3	27
Caso 4	29
Caso 5	33
Caso 6	36
Capitolo 3 Verifiche per strutture in acciaio	41
Simboli utilizzati	41
Elenco verifiche	41
Valutazione della classe della sezione	42
Trazione/compressione (Assiale)	42
Taglio semplice (Taglio)	43
Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)	43
Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)	43
Flesso-torsione (Flesso_torsione)	43
Flesso-torsione combinata (Flessotors_comb)	44
Verifiche di deformabilità	44
Verifiche da analisi non lineare	45
Capitolo 4 Verifiche per strutture in alluminio	47
Simboli utilizzati	47
Elenco verifiche	47
Valutazione della classe della sezione	48
Trazione/compressione (Assiale)	49
Taglio semplice (Taglio)	49
Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)	49
Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)	49
Flesso-torsione (Flesso_torsione)	50
Flesso-torsione combinata (Flessotors_comb)	50
Verifiche di deformabilità	50

Capitolo 5 Verifiche per strutture in calcestruzzo armato	52
Simboli utilizzati	52
Elenco verifiche	53
Verifiche statiche - Stati limite ultimi	53
Verifiche statiche - Stati limite di esercizio	54
Dettagli costruttivi	56
Verifiche sismiche	56
Verifiche geometriche	57
Verifica di duttilità	57
Taglio	57
Rapporto di compressione dei pilastri (RappComprPil)	58
Verifica dei nodi	58
Gerarchia delle resistenze	58
Particolari costruttivi - travi	59
Particolari costruttivi – pilastri	60
Particolari costruttivi – setti	60
Verifiche rinforzi in FRP	62
Verifiche da analisi non lineare	63
Codici errore	64
Capitolo 6 Verifiche per strutture in legno	65
Simboli utilizzati	65
Elenco verifiche	65
Stati limite ultimi	66
Stati limite ultimi per pannelli in XLam	68
Stati limite di esercizio	69
Capitolo 7 Verifiche per profili sottili in acciaio	71
Simboli utilizzati	71
Elenco verifiche	71
Ipotesi di calcolo	72
Valutazione della classe della sezione	73
Trazione/compressione (Assiale)	73
Taglio semplice (Taglio)	74
Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)	74
Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)	74
Flesso-torsione (Flesso_torsione)	74
Flesso-torsione combinata (Flessotors_comb)	75
Verifiche di deformabilità	75
Capitolo 8 Verifiche per profili sottili in alluminio	76
Simboli utilizzati	76

Elenco verifiche	76
Ipotesi di calcolo	77
Valutazione della classe della sezione	78
Trazione/compressione (Assiale)	78
Taglio semplice (Taglio)	79
Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)	79
Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)	79
Flesso-torsione (Flesso_torsione)	79
Flesso-torsione combinata (Flessotors_comb)	80
Verifiche di deformabilità	80
Capitolo 9 Verifiche per strutture in muratura	81
Simboli utilizzati	81
Elenco verifiche	81
Limite a trazione (RottTrazione)	82
Stabilità per carichi verticali (Assiale)	82
Pressoflessione nel piano (PressoflNelPiano)	82
Taglio nel piano (Taglio)	83
Pressoflessione fuori piano (PressoflFuoriPiano)	83
Muratura armata	84
Flessione	84
Taglio	84
Verifiche da analisi non lineare	84

Capitolo 1

Introduzione

Come richiesto dal D.M. 17/01/2018 “Norme tecniche per le costruzioni” al paragrafo 10.2, ogni progettista strutturale deve verificare l’affidabilità del codice di calcolo utilizzato e allegare alla relazione di calcolo tali valutazioni.

Nel secondo paragrafo verrà presentata la validazione del programma di calcolo seguendo le indicazioni delle norme di riferimento, elencati in seguito.

Nel terzo paragrafo saranno presentate le relazioni e le formule utilizzate per la verifica di membrature in acciaio.

Nel quarto paragrafo saranno presentate le relazioni e le formule utilizzate per la verifica di membrature in alluminio.

Nel quinto paragrafo saranno presentate le relazioni e le formule utilizzate per la verifica di elementi in calcestruzzo armato.

Il presente documento si applica solamente alle analisi lineari (statiche e dinamiche) condotte con *NextFEM Designer* e con il solutore predefinito (*OOFEM*).

Riferimenti normativi

I seguenti riferimenti normativi sono stati utilizzati:

1. D.M. 17/01/2018, Norme tecniche per le costruzioni, in seguito indicato con NTC2018
2. Circolare 21/01/2019 Min. Infrastrutture e Trasporti n. 7
3. **Circolare n.617 del 02/02/2009 Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni”** di cui al DM 14 gennaio 2008
4. UNI EN 1993-1-1 (Eurocodice 3)
5. UNI EN 1999-1-1 (Eurocodice 9)
6. UNI EN 1992-1-1 (Eurocodice 2).

Capitolo 2

Validazione del calcolo

Nel presente paragrafo sono presentate le motivazioni a tutti i requisiti della normativa NTC2018 relativi alla validazione del programma di calcolo utilizzato.

Si riporta un estratto dalla NTC2018 del paragrafo 10.2.

“10.2. ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista, dovrà **controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.**

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne **l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico.** In tal senso la **documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.**

10.2.1. RELAZIONE DI CALCOLO

Il progettista dovrà avere cura che nella Relazione di calcolo la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

Tipo di analisi svolta

Occorre preliminarmente:

- dichiarare il tipo di analisi strutturale condotta (di tipo statico o dinamico, lineare o non lineare) e le sue motivazioni;
 - indicare il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale e le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni.
 - indicare chiaramente le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti.
- In ogni **caso va motivato l'impiego delle combinazioni o dei percorsi di carico adottati, in specie con riguardo alla effettiva esaustività delle configurazioni studiate per la struttura in esame.**

Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo

Occorre indicare con precisione l'origine e le caratteristiche dei codici di calcolo utilizzati riportando titolo, autore, produttore, **versione, estremi della licenza d'uso o di altra forma di autorizzazione all'uso.**

Modalità di presentazione dei risultati.

La **quantità di informazioni che usualmente accompagna l'utilizzo di procedure di calcolo automatico richiede un'attenzione particolare** alle modalità di presentazione dei risultati, in modo che questi riassumano, in una sintesi completa ed efficace, il comportamento della struttura per quel particolare tipo di analisi sviluppata. In particolare, è necessario che la Relazione di calcolo riporti almeno le seguenti indicazioni:

- **descrizione dell'opera e della tipologia strutturale;**
- **inquadramento normativo dell'intervento;**
- definizione dei parametri di progetto;
- descrizione dei materiali adottati e loro caratteristiche meccaniche;
- criteri di progettazione e modellazione;
- combinazione delle azioni;
- codice di calcolo impiegato;
- rispetto delle verifiche per gli stati limite considerati.

L'esito di ogni elaborazione deve essere sintetizzato in disegni e schemi grafici contenenti, almeno per le parti più sollecitate della struttura, le configurazioni deformate, la rappresentazione grafica delle principali caratteristiche di sollecitazione o delle componenti degli sforzi, i diagrammi di involuppo associati alle combinazioni dei carichi considerate, gli schemi grafici con la rappresentazione dei carichi applicati e delle corrispondenti reazioni vincolari. Di tali grandezze, unitamente ai diagrammi ed agli schemi grafici, vanno chiaramente evidenziati le convenzioni sui segni, i valori numerici e le unità di misura di questi nei punti o nelle sezioni significative ai fini della valutazione del comportamento complessivo della struttura, i valori numerici necessari ai fini delle verifiche di misura della sicurezza. **E' opportuno che i tabulati generalmente forniti dai programmi automatici, cui la Relazione di calcolo deve fare riferimento, non facciano parte integrante della Relazione stessa, ma ne costituiscano un allegato.**

Informazioni generali sull'elaborazione.

A valle dell'esposizione dei risultati vanno riportate anche informazioni generali guardanti l'esame ed i controlli svolti sui risultati ed una valutazione complessiva dell'elaborazione dal punto di vista del corretto comportamento del modello.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.

Spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con riferimento a schemi o soluzioni noti e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni. Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc."

Tipo di analisi svolta

Analisi statiche

Il tipo di analisi strutturale svolta è lineare statica. La risoluzione del sistema di equazioni generato dal modello a Elementi Finiti è ottenuta tramite solver per sistemi lineari nella forma $Ax=b$.

Le combinazioni di carico adottate sono coerenti con quanto richiesto nel paragrafo 2.5.3 delle NTC2018 per gli Stati Limite Ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Fattori parziali di sicurezza:

- γ_{G1} : per carichi da peso proprio, di default pari a 1.5
- γ_{G2} : per carichi permanenti portati, di default pari a 1.5
- γ_{Qi} : per carichi variabili, di default pari a 1.5

Coefficienti di combinazione:

- ψ_{0i} di default pari a 0.7 per carichi variabili verticali (dipendenti dalla Categoria della costruzione)
- ψ_{0i} di default pari a 0.6 per carichi variabili da vento
- ψ_{0i} di default pari a 0.5 per carichi variabili da neve (dipendente dalla quota, < 1000m s.l.m.)

Le combinazioni SLU sono generate automaticamente con il comando *Assegna/Combinazioni di carico... / Genera combinazioni statiche*. Riferirsi al manuale d'uso del programma per l'utilizzo della maschera.

I coefficienti di combinazione dei carichi sono dedotti dalla tabella 2.5.I della NTC2018.

Tabella 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0i}	Ψ_{1i}	Ψ_{2i}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

È possibile esportare in formato tabellare le combinazioni di carico tramite il comando *Esporta combo*.

Origine e caratteristiche dei codici di calcolo

Il codice di calcolo utilizzato di compone di 2 parti distinte:

- Il pre- e post- processor, *NextFEM Designer* (il programma visibile all'utente), che gestisce la fase di input dei dati e della visualizzazione dei risultati, oltre alla generazione delle combinazioni di carico e le verifiche. Il programma è fornito all'utente con la licenza d'uso allegata, accessibile dal comando *?/Informazioni su... / Licenza del prodotto*. *NextFEM Designer* è prodotto da NextFEM, con esclusione dei pacchetti elencati in *?/Informazioni su...*
- Il solutore, *OOFEM*, viene utilizzato di default per eseguire il calcolo. Altri tipi di solutori, sebbene impostabili dalle opzioni del programma, non sono supportati ai fini della validazione presentata. *OOFEM* viene concesso con licenza LGPL, riportata in *?/Informazioni su...* e allegata al pacchetto software. Il solutore è sviluppato dal prof. Borek Patzak, Università di Praga, e dalla comunità di *oofem.org*.

Affidabilità e validazione dei codici

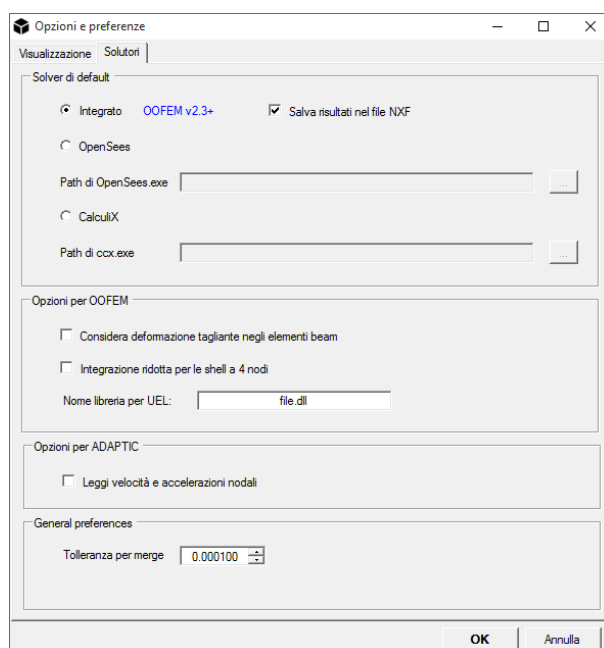
La validazione, comprensiva di calcolo manuale della quantità ottenute, è presentata al Capitolo 5 del manuale d'uso del programma.

Si riporta in seguito una versione ridotta ai fini dell'analisi di strutture a telaio.

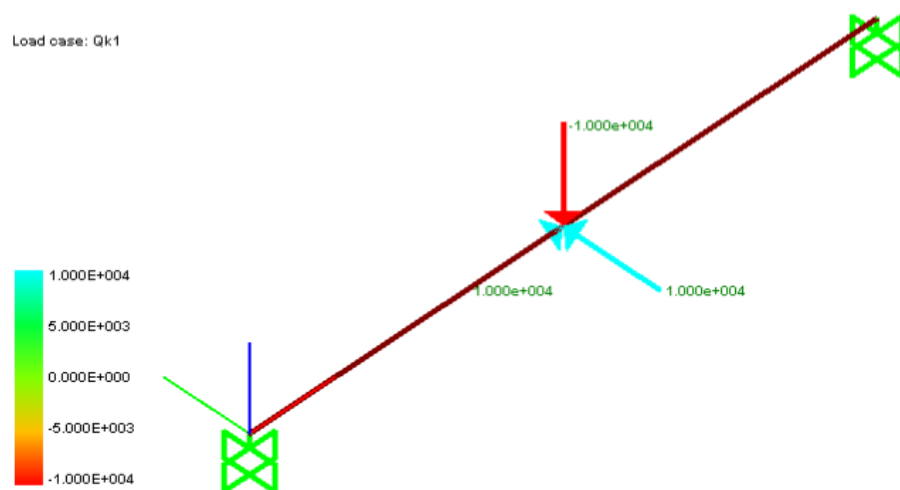
Caso 1

Questo primo tutorial mostra come modellare una trave di 5 metri di lunghezza, caricata con carichi concentrati in mezzzeria nelle 3 direzioni. I risultati del programma (spostamenti e sollecitazioni) sono confrontati con un calcolo condotto manualmente.

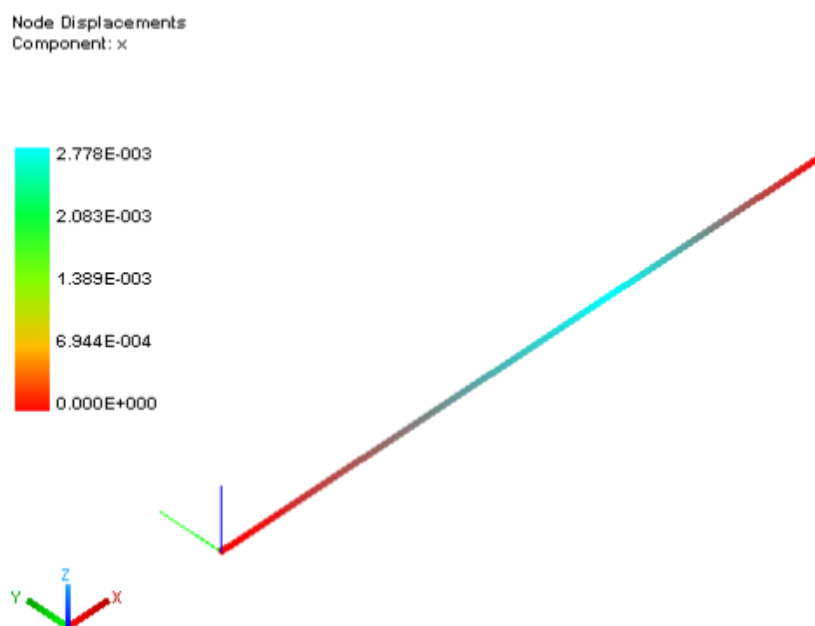
⚠ AVVISO: sia la deformabilità flessionale che tagliante sono state considerate. Per abilitare queste opzioni, cliccare su *Strumenti>Opzioni>Solutore* e abilitare *Considera deformazione tagliante negli elementi beam* nel box *Opzioni per OOFEM*.



- Unità: *N* per la forza e *mm* per la lunghezza.
- Proprietà del materiale:
 - o Nome: Concrete;
 - o $E=30000 \text{ N/mm}^2$;
 - o $\nu=0.3$
 - o $f_k=25 \text{ N/mm}$
 - o Peso specifico $=2.5e-5 \text{ N/mm}^3$;
 - o Densità di massa $=2.55e-9 \text{ N/mm}^2/\text{g}$
- Proprietà della sezione:
 - o $B=300 \text{ mm}$ (z);
 - o $H=500 \text{ mm}$ (y);
- Geometria:
 - o $L=5000 \text{ mm}$;
- Carichi:
 - o $P_y=10000 \text{ N}$;
 - o $P_z=-10000 \text{ N}$.

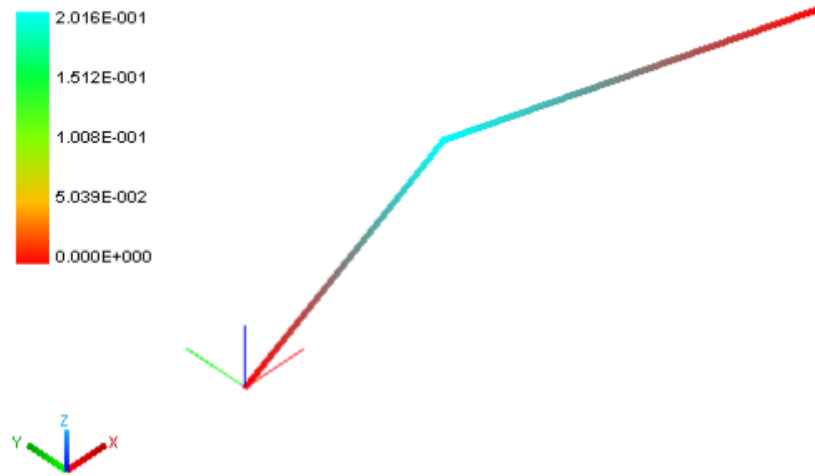


- Risultati di *NextFEM Designer*:
 - o Spostamento in direzione x: Nodo 2=0.002778mm



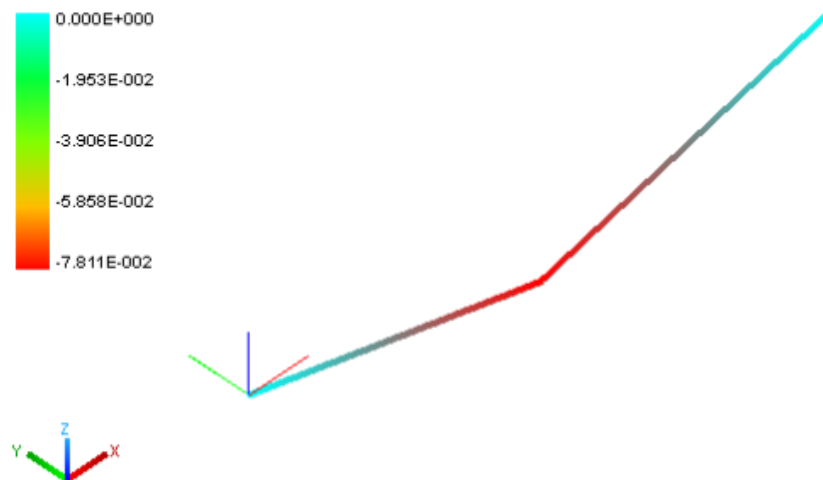
- o Spostamento in direzione y: Nodo 2=0.2016mm

Node Displacements
Component: y

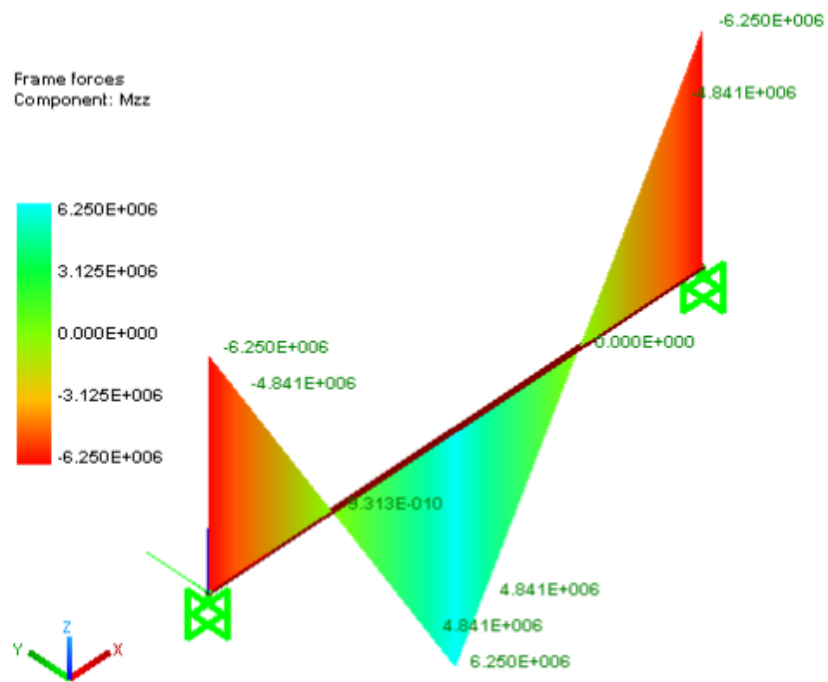


- Spostamento in direzione z: Nodo 2=-0.00781 mm

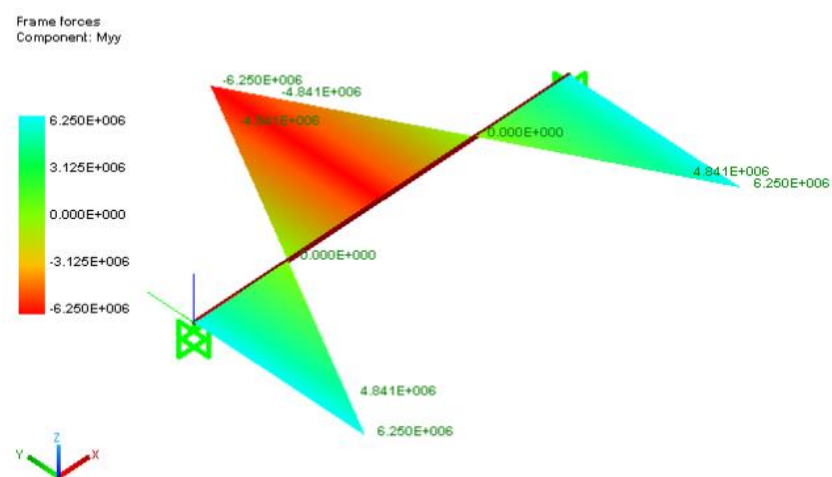
Node Displacements
Component: z



- Diagramma del momento: valori da *Risultati>Estrai dati*
 - Mzz

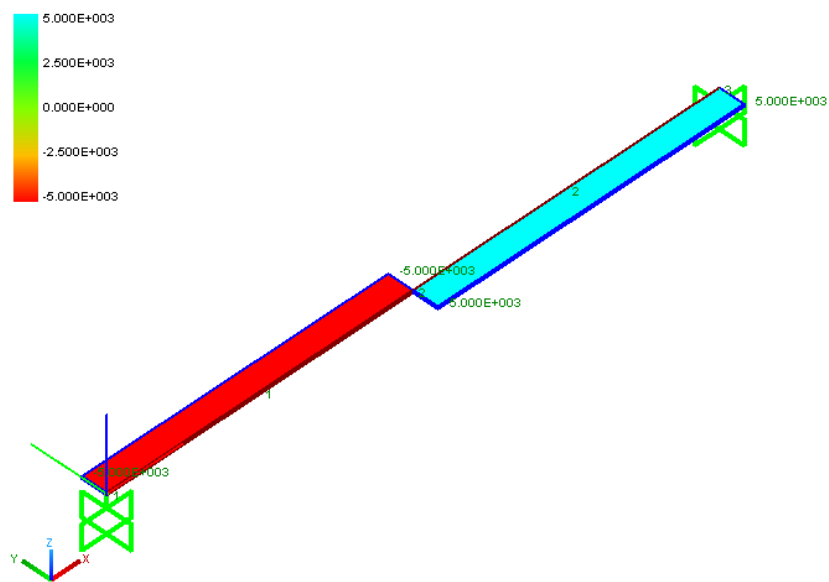
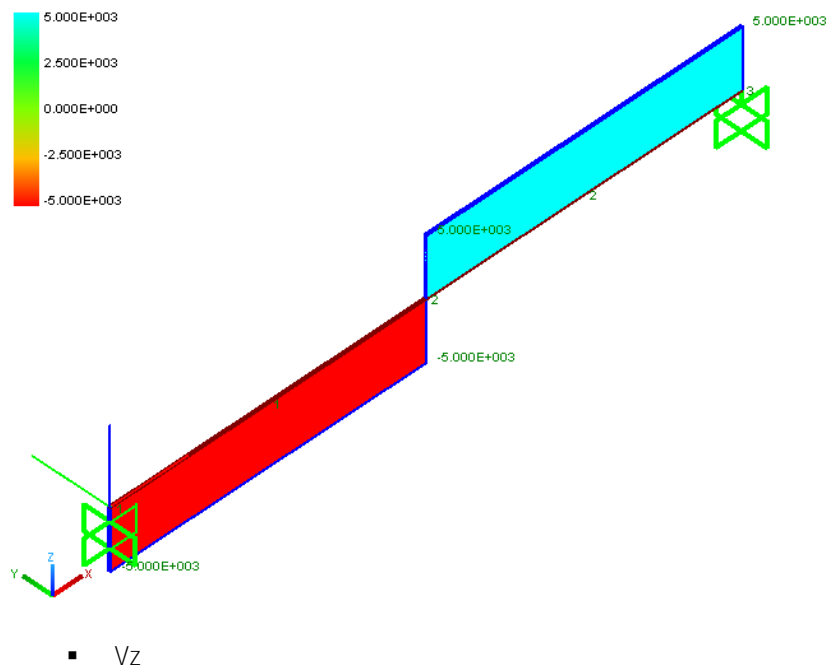


■ Myy

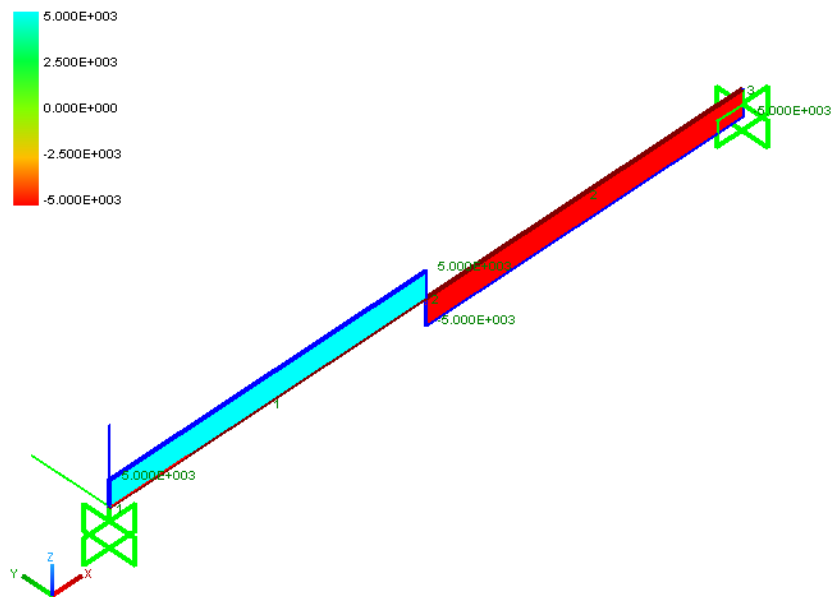


○ Diagramma del taglio:

■ Vy



- Diagramma dell'azione assiale:



- Spostamenti interni alla trave in direzione y: valori da *Risultati>Estrai dati*

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	0.00778
1250	0.1008
2218	0.1938
2500	0.2016
2500	0.2016
2781.8	0.1938
3750	0.1008
4718	0.00778
5000	0

- Spostamenti interni alla trave in direzione z: valori da *Risultati>Estrai dati*

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	-0.003424
1250	-0.03906
2218	-0.07469
2500	-0.07811
2500	-0.07811
2781.8	-0.07469
3750	-0.03906
4718	-0.003424
5000	0

- Calcolo manuale:

- Proprietà della sezione

$$A = b \cdot h = 150000 \text{ mm}^2$$

$$J_y = \frac{bh^3}{12} = 3125e6 \text{ mm}^4$$

$$J_z = \frac{hb^3}{12} = 1125e6 \text{ mm}^4$$

- Diagramma dei momenti:

- Mzz

$$M_{\max} = \frac{P_z l}{8} = 6250000 \text{ Nmm} ; M_{\min} = -\frac{P_z l}{8} = -6250000 \text{ Nmm}$$

▪ Myy

$$M_{\max} = \frac{P_y l}{8} = 6250000 \text{ Nmm} ; M_{\min} = -\frac{P_y l}{8} = -6250000 \text{ Nmm}$$

○ Diagramma del taglio:

▪ Vy

$$V_{\max} = \frac{P_z}{2} = 5000 \text{ N} ; V_{\min} = -\frac{P_z}{2} = -5000 \text{ N}$$

▪ Vz

$$V_{\max} = \frac{P_y}{2} = 5000 \text{ N} ; V_{\min} = -\frac{P_y}{2} = -5000 \text{ N}$$

○ Diagramma dell'azione assiale:

$$N_{\max} = \frac{P_x}{2} = 5000 \text{ N} ; N_{\min} = -\frac{P_x}{2} = -5000 \text{ N}$$

○ Spostamento in direzione x: Nodo 2

$$u_{2,x} = \frac{N_{\max} (l/2)}{EA} = 0.00278 \text{ mm}$$

○ Spostamento in direzione y: Nodo 2

$$u_{2,y} = \frac{1}{192} \frac{P_y l^3}{EJ_z} + \chi \frac{P_y l}{4GA} = 0.201568 \text{ mm}$$

○ Spostamento in direzione y: punto alla coordinata x generica della trave

$$u_{x,y} = \frac{1}{24} \frac{P_y x^2 \left(\frac{3}{2} l - 2x \right)}{EJ_z} + \chi \frac{P_y x}{2GA} \text{ per la prima metà della trave (per } 0 \leq x \leq L/2)$$

$$u_{x,y} = \frac{1}{24} \frac{P_y (L-x)^2 \left(2x - \frac{L}{2} \right)}{EJ_z} + \chi \frac{P_y (L-x)}{2GA} \text{ per la seconda metà della trave (per } L/2 \leq x \leq L)$$

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	0.00778
1250	0.1008
2218	0.1938
2500	0.2016
2500	0.2016
2781.8	0.1938
3750	0.1008
4718	0.00779
5000	0

○ Spostamento in direzione z: Nodo 2

$$u_{2,z} = \frac{1}{192} \frac{P_z l^3}{EJ_y} + \chi \frac{P_z l}{4GA} = -0.07811 \text{ mm}$$

- Spostamento in direzione y: punto alla coordinata x generica della trave

$$u_{x,z} = \frac{1}{24} \frac{P_z x^2 \left(\frac{3}{2} l - 2x \right)}{EJ_y} + \chi \frac{P_z x}{2GA} \text{ per la prima metà della trave (per } 0 \leq x \leq L/2 \text{)}$$

$$u_{x,z} = \frac{1}{24} \frac{P_z (L-x)^2 \left(2x - \frac{L}{2} \right)}{EJ_y} + \chi \frac{P_z (L-x)}{2GA} \text{ per la seconda metà della trave (per } L/2 \leq x \leq L \text{)}$$

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	-0.003425
1250	-0.03906
2218	-0.07468
2500	-0.07811
2500	-0.07811
2781.8	-0.07469
3750	-0.03906
4718	-0.003429
5000	0

Caso 2

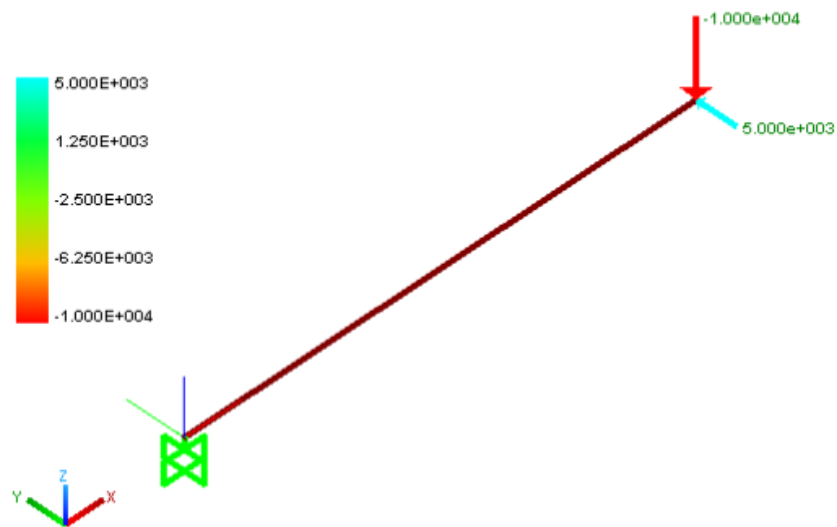
Il secondo tutorial è diviso in due parti e consiste in una trave a mensola con carichi in direzioni y e z. I risultati del programma (spostamenti e sollecitazioni) sono confrontati con un calcolo condotto manualmente sia nel caso in cui la deformabilità a taglio venga trascurata (caso 2a) o meno (caso 2b)

Caso 2a

 Solo la deformabilità flessionale delle travi viene considerata.

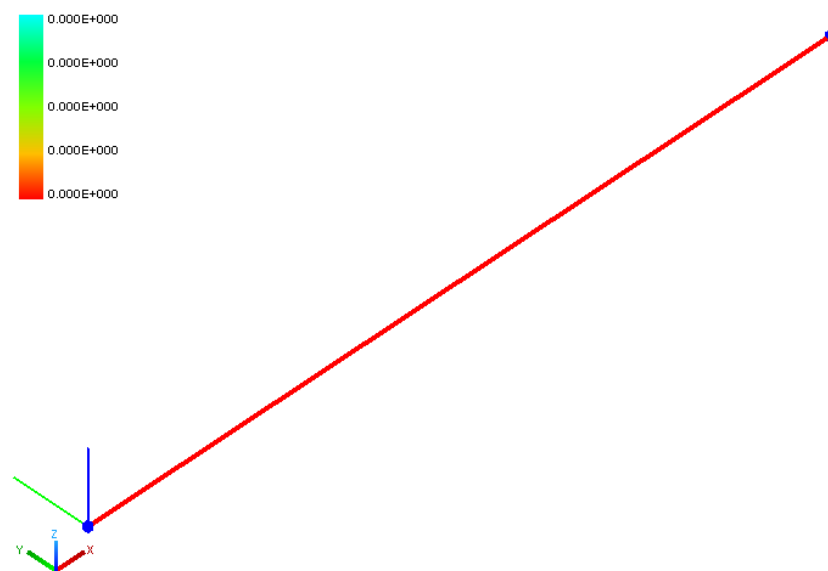
- Unità: N per la forza e mm per la lunghezza.
- Proprietà del materiale:
 - Nome: Concrete;
 - E=30000 N/mm²;
 - ν=0.3
 - f_k=25 N/mm
 - Peso specifico =2.5e-5 N/mm³;
 - Densità di massa =2.55e-9 N/mm²/g
- Proprietà della sezione:
 - B=300 mm (z);
 - H=500mm (y);
- Geometria:
 - L=2500 mm;
- Carichi:
 - P_y=5000 N;
 - P_z=-10000 N.

Load case: Qk1

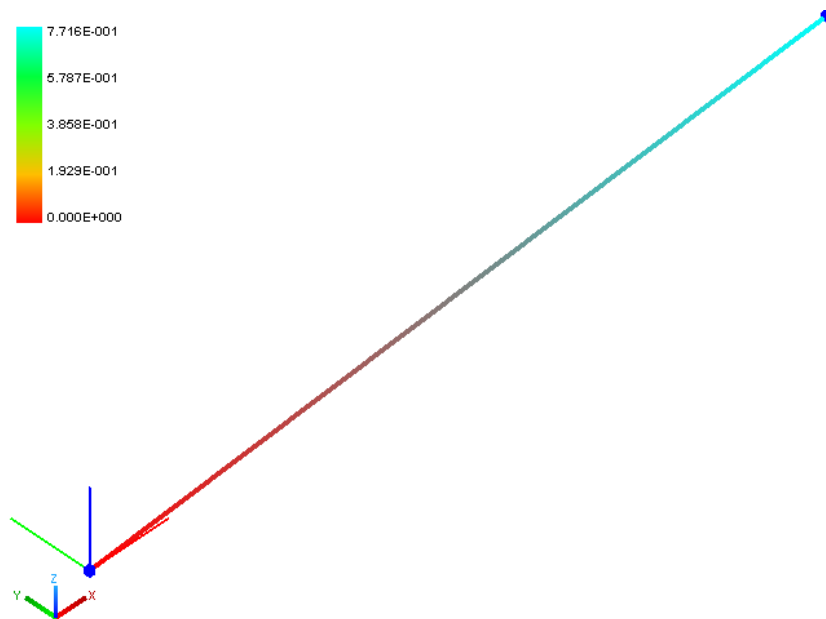


- Risultati del programma:

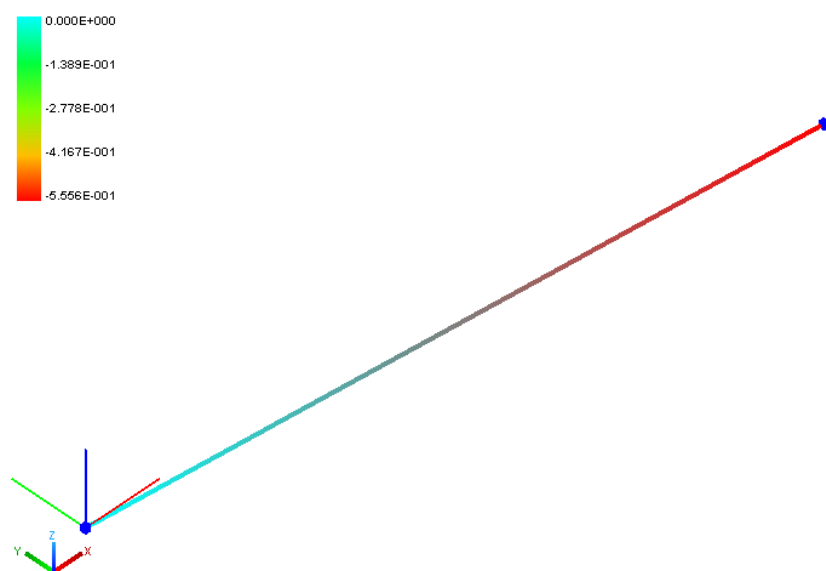
- o Spostamento in direzione x: Nodo 2=0.00mm



- o Spostamento in direzione y: Nodo 2=0.7716mm

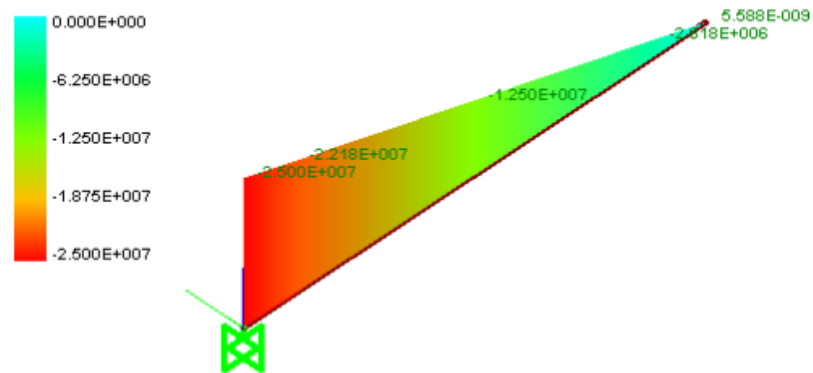


- o Spostamento in direzione z: Nodo 2=-0.5556mm



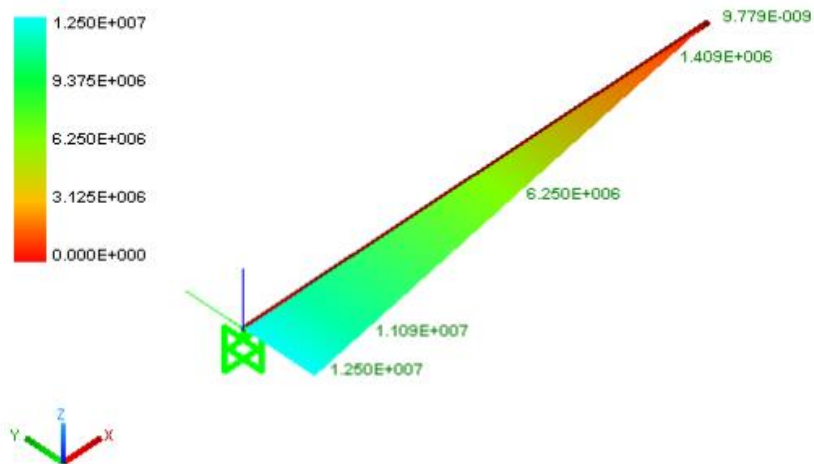
- o Diagramma del momento: valori da *Risultati>Estrai dati*
 - Mzz

Frame forces
Component: Mzz



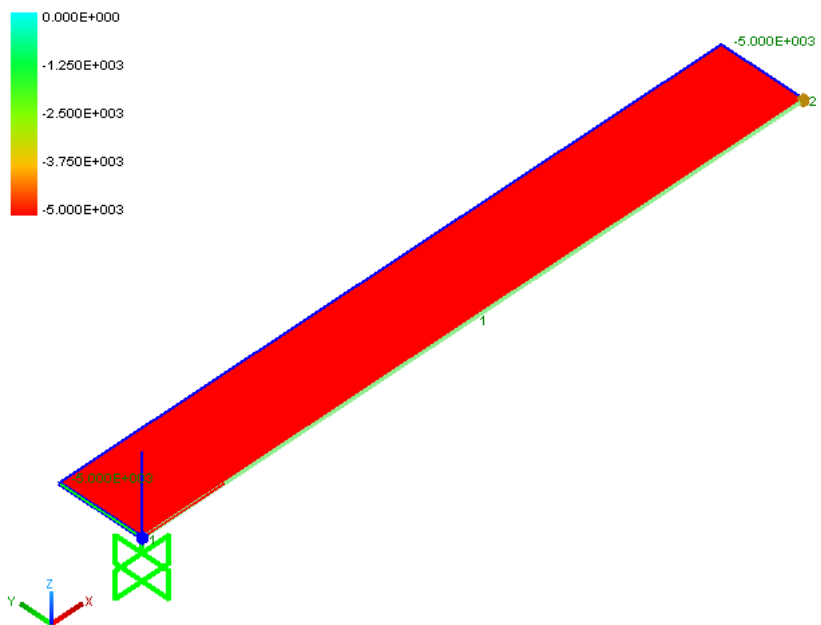
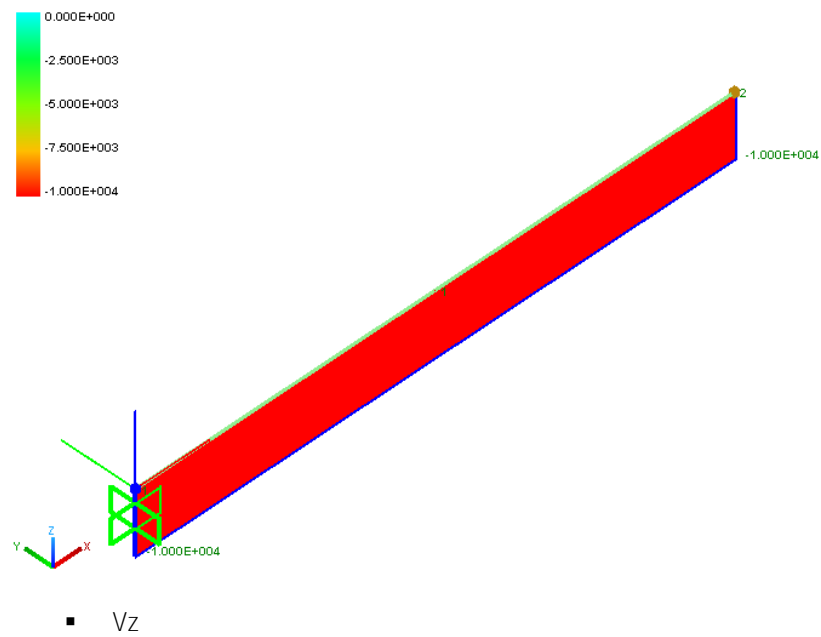
■ Myy

Frame forces
Component: Myy



○ Diagramma del taglio:

■ Vy



- Spostamenti interni alla trave in direzione y: valori da *Risultati>Estrai dati*

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	0.01415
1250	0.2411
2218	0.6417
2500	0.7716

- Spostamenti interni alla trave in direzione z: valori da *Risultati>Estrai dati*

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	-0.01019
1250	-0.1736
2218	-0.4620
2500	-0.5556

- Calcolo manuale:

o Diagramma dei momenti:

▪ M_{zz}

$$M_{\max} = P_z l = 25000000 \text{ Nmm} ;$$

▪ M_{yy}

$$M_{\max} = P_y l = 12500000 \text{ Nmm}$$

o Diagramma del taglio:

▪ V_y

$$V_{\max} = P_z = 10000 \text{ N} ;$$

▪ V_z

$$V_{\max} = P_y = 5000 \text{ N} ;$$

o Diagramma dell'azione assiale:

$$N_{\max} = 0 \text{ N} ;$$

o Spostamento in direzione x: Nodo 2

$$u_{2,x} = 0 \text{ mm}$$

o Spostamento in direzione y: Nodo 2

$$u_{2,y} = \frac{1}{3} \frac{P_y l^3}{EJ_z} = 0.77160 \text{ mm}$$

o Spostamento in direzione y: punto alla coordinata x generica della trave

$$u_{x,y} = \frac{1}{6} \frac{P_y x^2 (3l - x)}{EJ_z}$$

Coordinata x [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	0.01415
1250	0.2411
2218	0.6416
2500	0.7716

o Spostamento in direzione z: Nodo 2

$$u_{2,z} = \frac{1}{3} \frac{P_z l^3}{EJ_y} = -0.5556 \text{ mm}$$

o Spostamento in direzione z: punto alla coordinata x generica della trave

$$u_{x,z} = \frac{1}{6} \frac{P_z x^2 (3l - x)}{EJ_y}$$

Coordinata x [mm]	Spostamento [mm]
-------------------	------------------

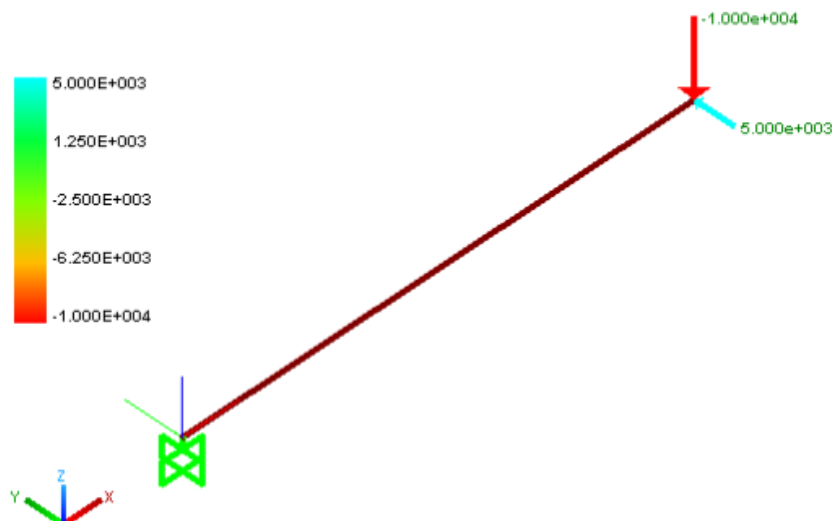
0	0
281.8	-0.01019
1250	-0.1736
2218	-0.4620
2500	-0.5556

Caso 2b

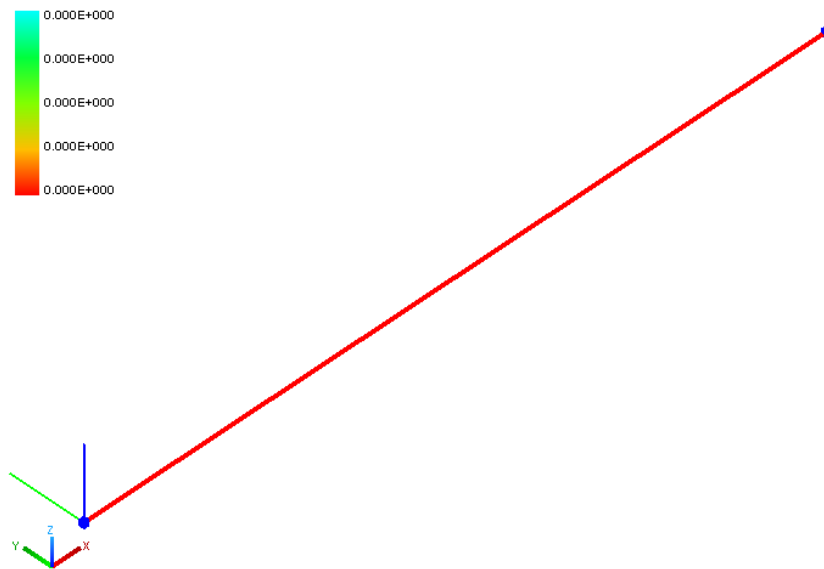
⚠ AVVISO: sia la deformabilità flessionale che tagliante sono state considerate. Per abilitare queste opzioni, cliccare su *Strumenti>Opzioni>Solutore* e abilitare *Considera deformazione tagliante negli elementi beam* nel box *Opzioni per OOFEM*.

- Unità: *N* per la forza e *mm* per la lunghezza.
- Proprietà del materiale:
 - o Nome: Concrete;
 - o $E=30000 \text{ N/mm}^2$;
 - o $\nu=0.3$
 - o $f_k=25 \text{ N/mm}$
 - o Peso specifico $=2.5e-5 \text{ N/mm}^3$;
 - o Densità di massa $=2.55e-9 \text{ N/mm}^2/\text{g}$
- Proprietà della sezione:
 - o $B=300 \text{ mm (z)}$;
 - o $H=500 \text{ mm (y)}$;
- Geometria:
 - o $L=2500 \text{ mm}$;
- Carichi:
 - o $P_y=5000 \text{ N}$;
 - o $P_z=-10000 \text{ N}$.

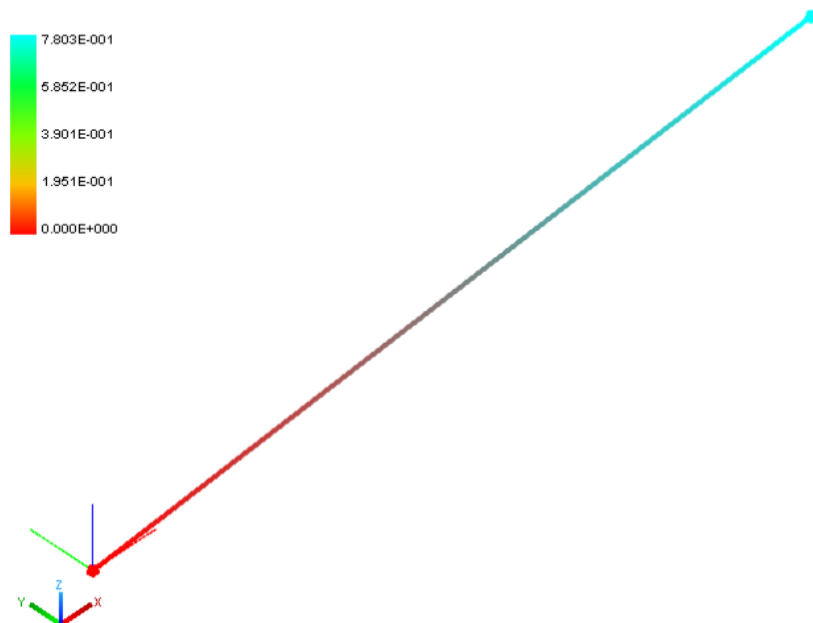
Load case: Qk1



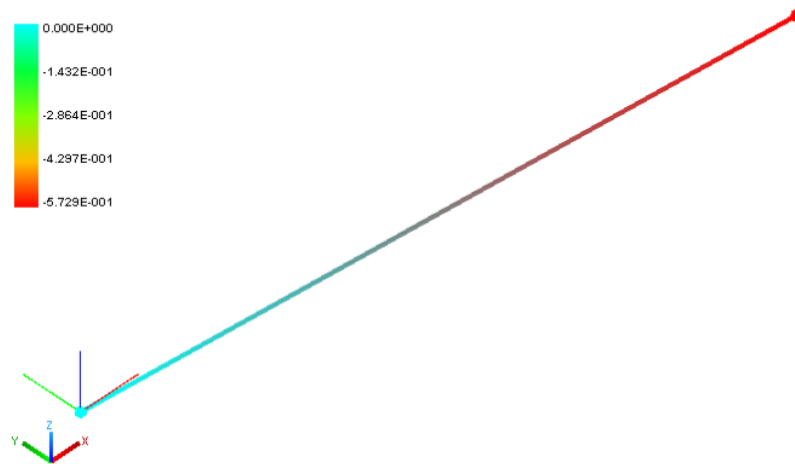
- Risultati del programma:
 - o Spostamento in direzione x: Nodo 2=0.00mm



- Spostamento in direzione y: Nodo 2=0.7803mm

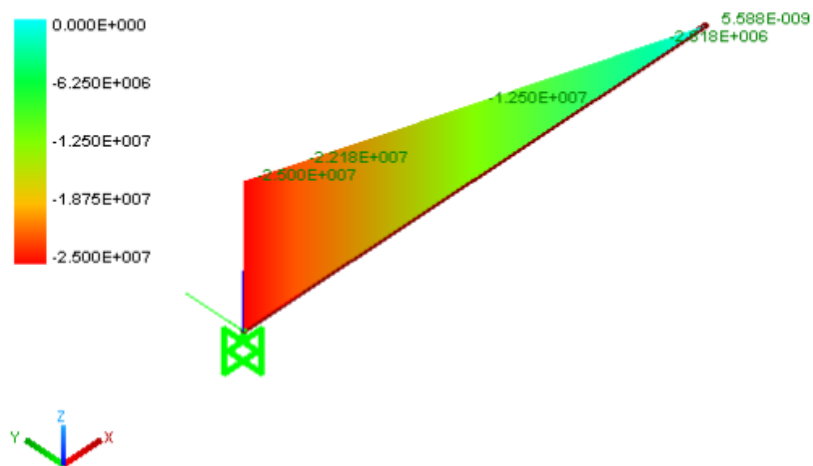


- Spostamento in direzione z: Nodo 2=-0.5729mm



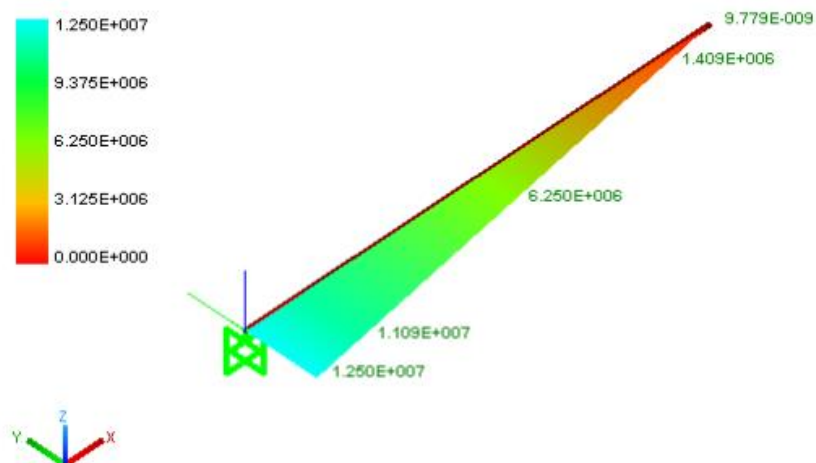
- o Diagramma del momento: valori da *Risultati*>*Estrai dati*
 - Mzz

Frame forces
Component: Mzz



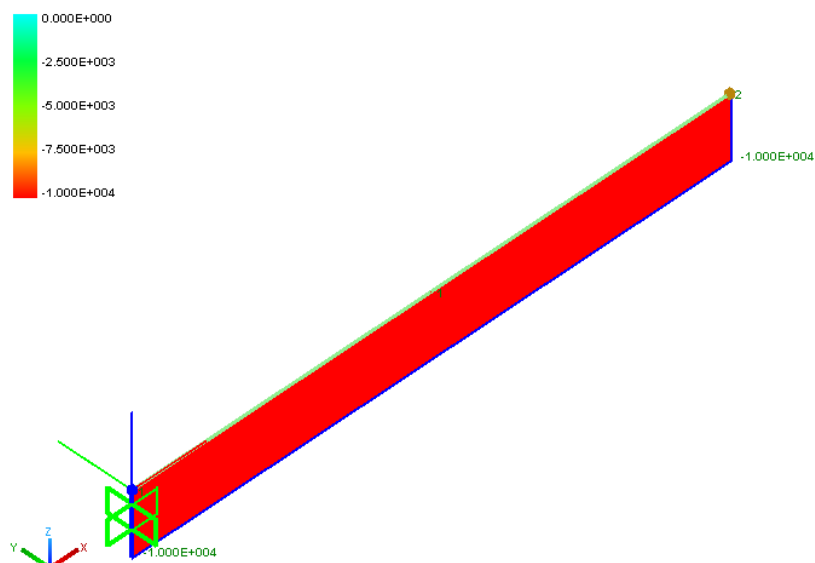
- Myy

Frame forces
Component: Myy

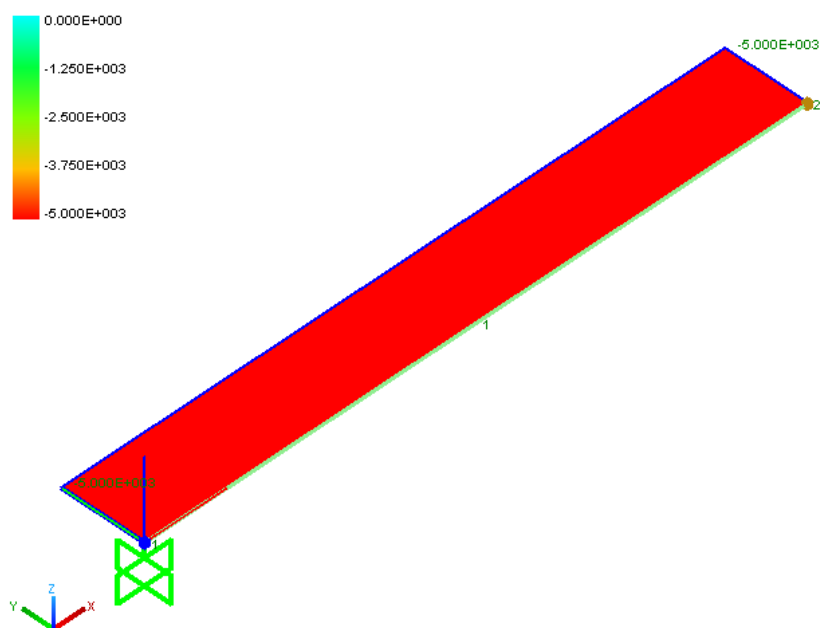


- Diagramma del taglio:

■ V_y



■ V_z



- Spostamenti interni alla trave in direzione y: valori da *Risultati>Estrai dati*

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	0.01513
1250	0.2455
2218	0.6494
2500	0.7803

- Spostamenti interni alla trave in direzione z: valori da *Risultati>Estrai dati*

Posizione [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	-0.01214
1250	-0.1823
2218	-0.4774
2500	-0.5729

- Calcolo manuale:

- Diagramma dei momenti:

- M_{zz}

$$M_{\max} = P_z l = 25000000 \text{ Nmm} ;$$

- M_{yy}

$$M_{\max} = P_y l = 12500000 \text{ Nmm}$$

- Diagramma del taglio:

- V_y

$$V_{\max} = P_z = 10000 \text{ N} ;$$

- V_z

$$V_{\max} = P_y = 5000 \text{ N} ;$$

- Diagramma dell'azione assiale:

$$N_{\max} = 0 \text{ N} ;$$

- Spostamento in direzione x: Nodo 2

$$u_{2,x} = 0 \text{ mm}$$

- Spostamento in direzione y: Nodo 2

$$u_{2,y} = \frac{1}{3} \frac{P_y l^3}{EJ_z} + \chi \frac{P_y l}{GA} = 0.7803 \text{ mm}$$

- Spostamento in direzione y: punto alla coordinata x generica della trave

$$u_{x,y} = \frac{1}{6} \frac{P_y x^2 (3l - x)}{EJ_z} + \chi \frac{P_y x}{GA}$$

Coordinata x [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	0.01513
1250	0.2455
2218	0.6493
2500	0.7803

- Spostamento in direzione z: Nodo 2

$$u_{2,z} = \frac{1}{3} \frac{P_z l^3}{EJ_y} + \chi \frac{P_z l}{GA} = -0.5729 \text{ mm}$$


- Spostamento in direzione z: punto alla coordinata x generica della trave

$$u_{x,z} = \frac{1}{6} \frac{P_z x^2 (3l - x)}{EJ_y} + \chi \frac{P_z x}{GA}$$

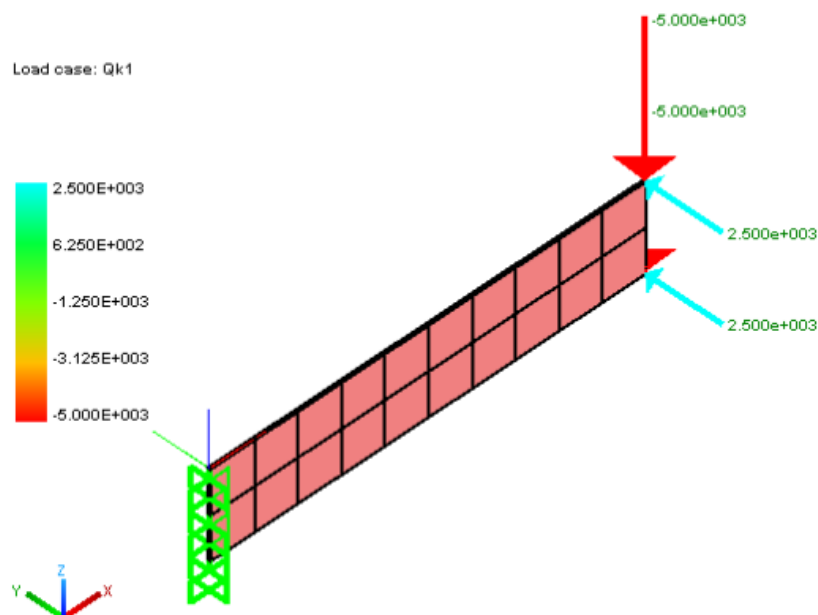
Coordinata x [mm]	Spostamento [mm]
0	0
281.8	-0.01214
1250	-0.1823
2218	-0.4773
2500	-0.5729

Caso 3

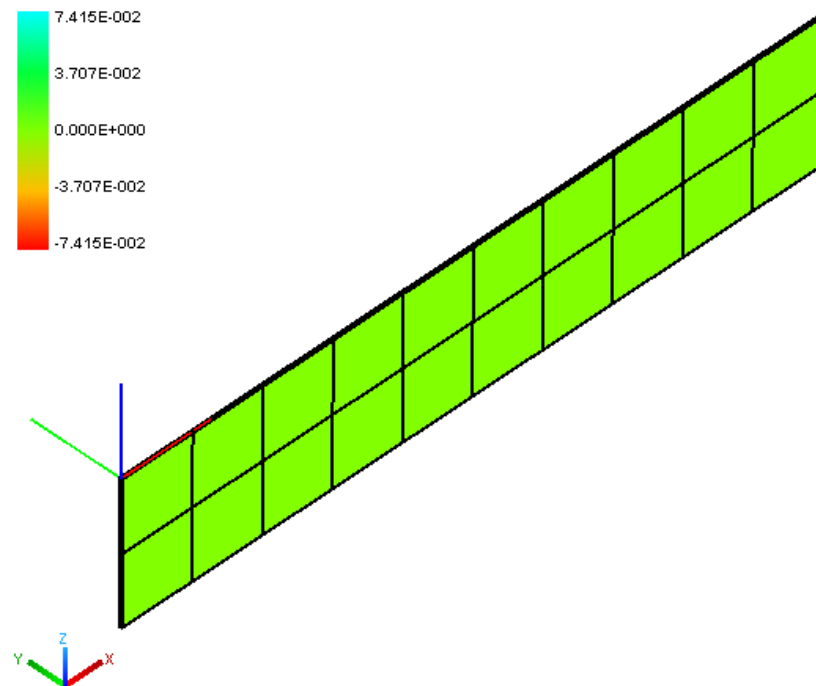
Il secondo tutorial consiste in una trave a mensola con carichi in direzioni y e z modellata con elementi shell (conformi alla teoria di Mindlin-Reissner). I risultati del programma (spostamenti e sollecitazioni) sono confrontati con un calcolo condotto manualmente.

 Solo la deformabilità flessionale delle travi viene considerata.

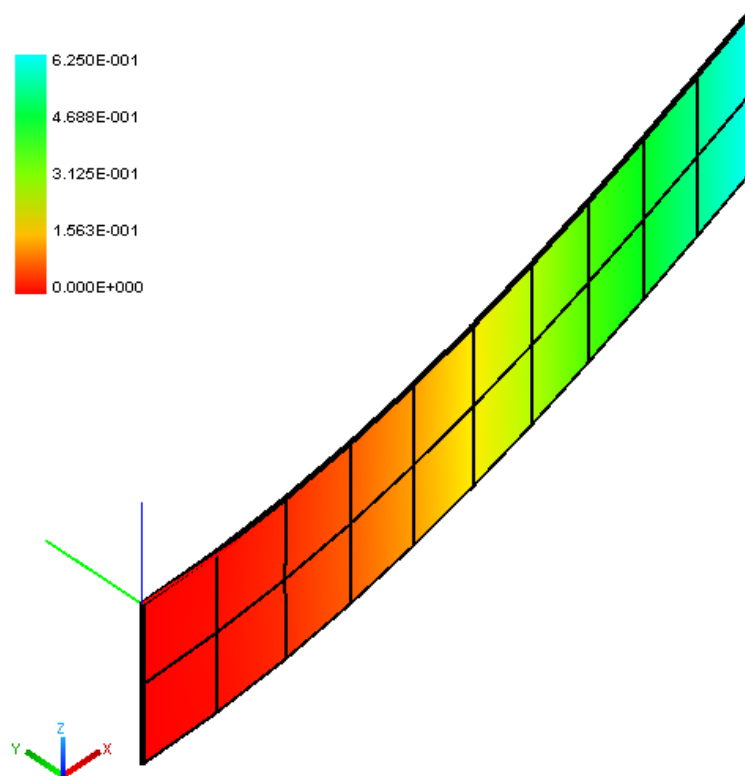
- Unità: N per la forza e mm per la lunghezza.
- Proprietà del materiale:
 - Nome: Concrete;
 - $E=30000 \text{ N/mm}^2$;
 - $\nu=0.3$
 - $f_k=25 \text{ N/mm}$
 - Peso specifico $=2.5 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$;
 - Densità di massa $=2.55 \times 10^{-9} \text{ N/mm}^2/\text{g}$
- Proprietà della sezione:
 - Sezione piana di 300mm di spessore;
- Geometria:
 - $L=5000 \text{ mm}$;
- Carichi:
 - $P_y=5000 \text{ N}$;
 - $P_z=10000 \text{ N}$;
- Dimensione della mesh: 250x250 mm



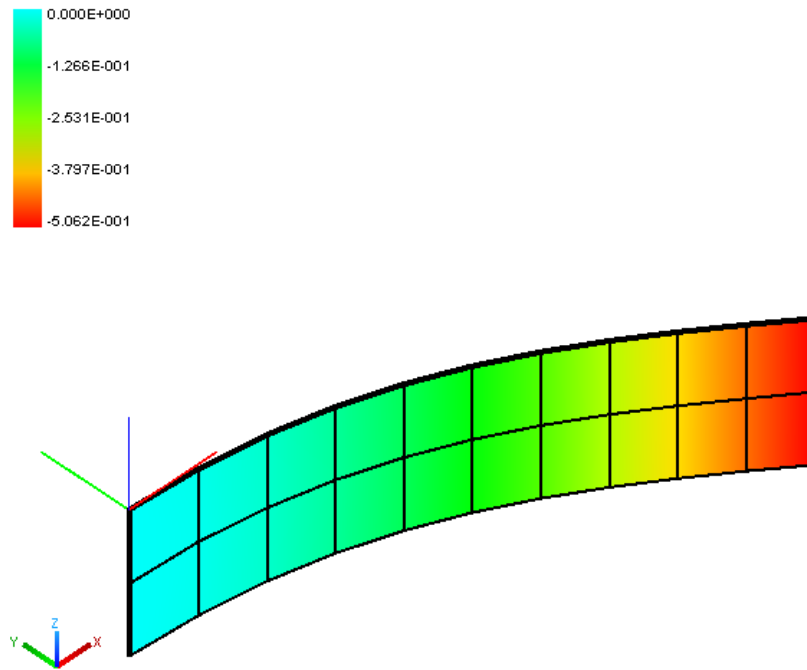
- Risultati del programma:
 - o Spostamento in direzione x: Nodo 2=0.00mm



- o Spostamento in direzione y: Nodo 2=0.6250 mm



- o Spostamento in direzione z: Nodo 2=-0.5062mm

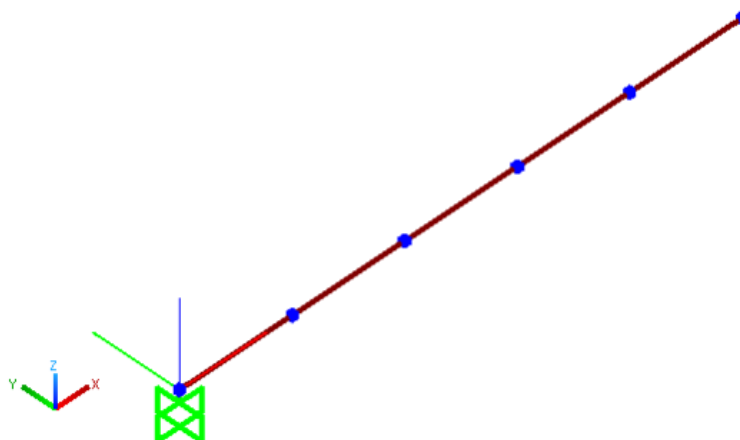


- Calcolo manuale (vedi tutorial Due):
 - o Spostamento in direzione y:
 - Calcolo manuale: 0.77160mm
 - NextFEM designer: 0.6250mm
 - Differenza: 19%
 - o Spostamento in direzione z:
 - Calcolo manuale: -0.5556mm
 - NextFEM designer: -0.5062mm
 - Differenza: 9%

La differenza rilevata è dovuta al cambio di elementi e alla dimensione della mesh.

Caso 4

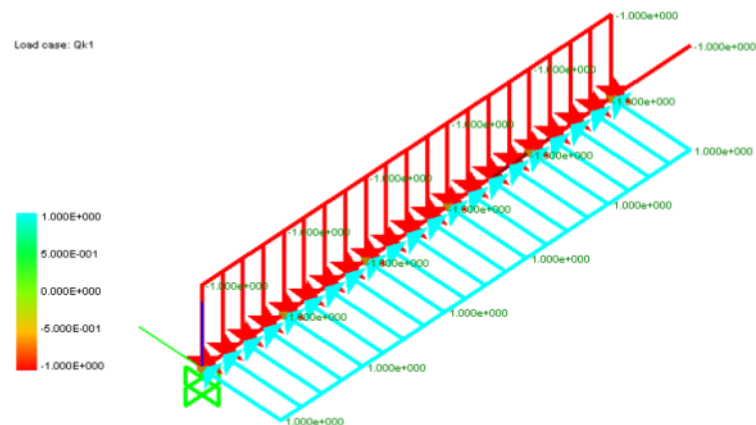
Il quarto tutorial consiste in una trave a mensola con carichi distribuiti in direzioni x, y e z. I risultati del programma (spostamenti e sollecitazioni) sono confrontati con un calcolo condotto manualmente.



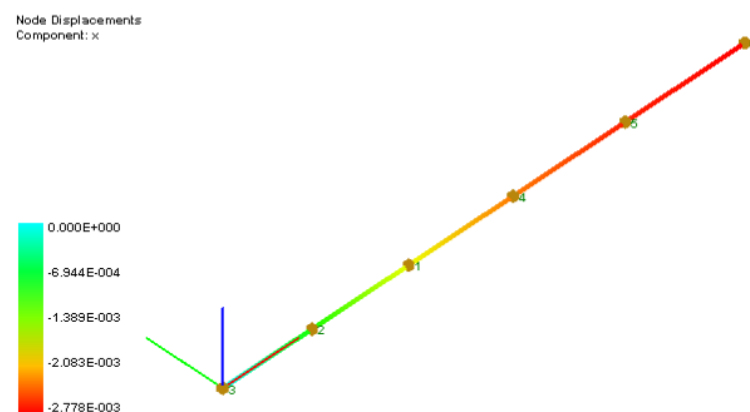
⚠ Solo la deformabilità flessionale delle travi viene considerata.

- Unità: *N* per la forza e *mm* per la lunghezza.

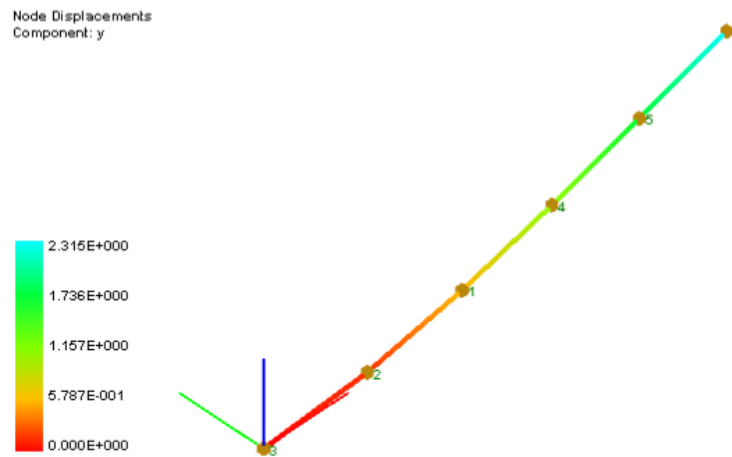
- Proprietà del materiale:
 - o Nome: Concrete;
 - o $E=30000 \text{ N/mm}^2$;
 - o $\nu=0.3$
 - o $f_k=25 \text{ N/mm}$
 - o Peso specifico $=2.5e-5 \text{ N/mm}^3$;
 - o Densità di massa $=2.55e-9 \text{ N/mm}^2/\text{g}$
- Section properties:
 - o $B=300 \text{ mm}$ (y direction);
 - o $H=500\text{mm}$ (z direction);
- Proprietà della sezione:
 - o $B=300 \text{ mm}$ (z);
 - o $H=500\text{mm}$ (y);
- Geometria:
 - o $L=5000 \text{ mm}$;
- Carichi:
 - o $q_y=1 \text{ N/mm}$;
 - o $q_z=-1 \text{ N/mm}$;
 - o $q_x=-1 \text{ N/mm}$.



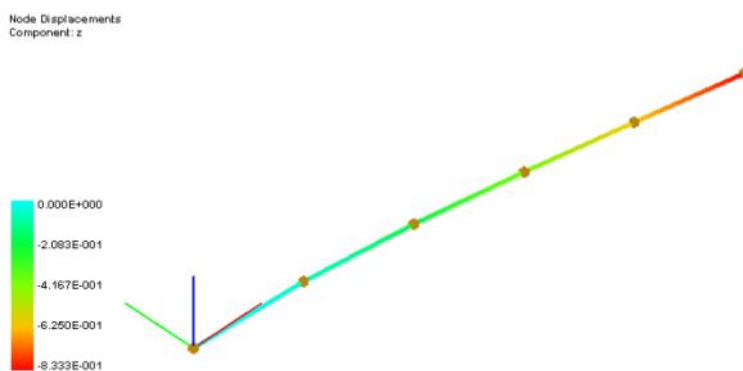
- Risultati del programma:
 - o Spostamento in direzione x: Nodo 6=-0.00278mm



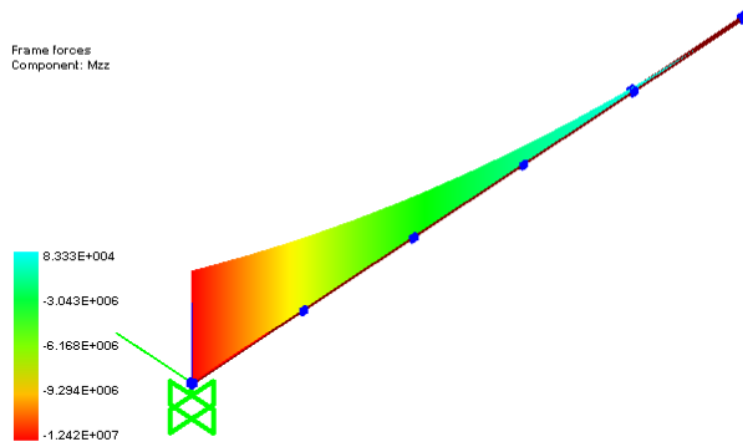
- o Spostamento in direzione y: Nodo 6=2.315mm



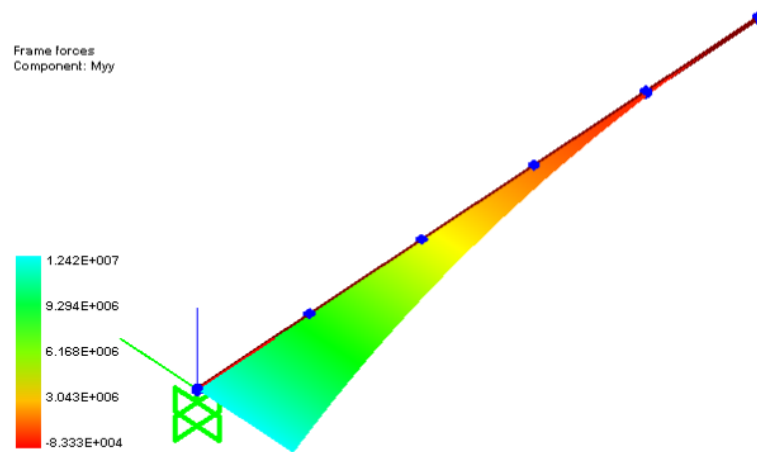
- o Spostamento in direzione z: Nodo 6=-0.8333mm



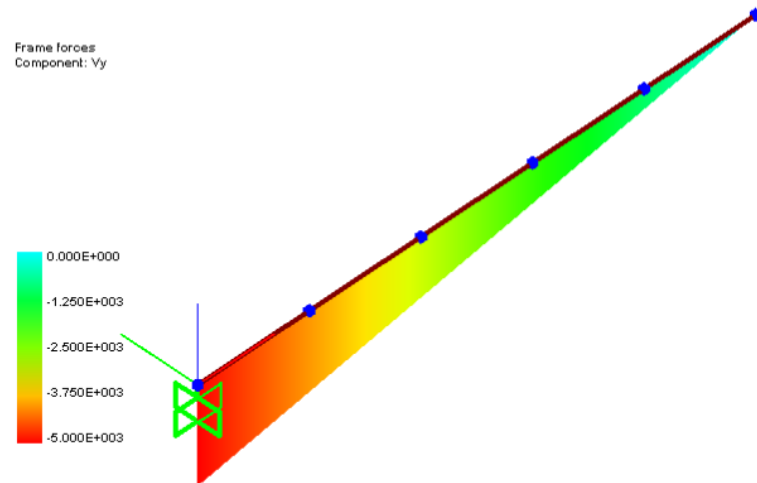
- o Diagramma del momento: valori da *Risultati>Estrai dati*
 - Mzz max: nodo 1: 125e9 Nmm



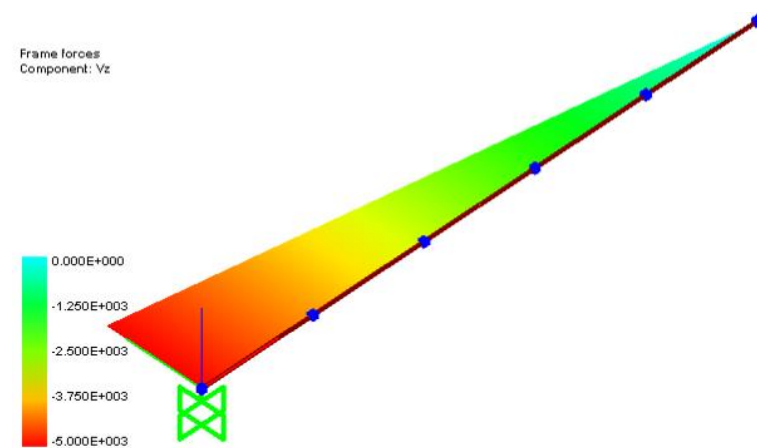
- Myy max: nodo 1: 125e9 Nmm



- Diagramma del taglio:
 - V_y



- V_z



- Calcolo manuale:
 - Diagramma dei momenti:
 - M_{zz}
 - M_{yy}

$$M_{\max} = \frac{q_c l^2}{2} = 125000000000 \text{ Nmm} ;$$

$$M_{\max} = \frac{q_y l^2}{2} = 125000000000 \text{ Nmm};$$

- Diagramma del taglio:

$$\blacksquare V_y$$

$$V_{\max} = q_z l = 5000 \text{ N};$$

$$\blacksquare V_z$$

$$V_{\max} = q_y l = 5000 \text{ N};$$

- Diagramma dell'azione assiale:

$$N_{\max} = q_x l = 5000 \text{ N};$$

- Spostamento massimo in direzione x: Nodo 6

$$u_{6,x} = \frac{q_x l^2}{2EA} = 0.00278 \text{ mm}$$

- Spostamento massimo in direzione y: Nodo 6

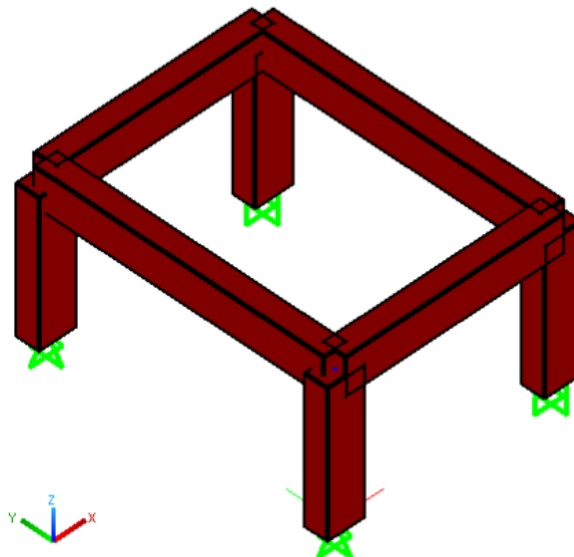
$$u_{6,y} = \frac{q_y l^4}{8EJ_y} = 2.315 \text{ mm}$$

- Spostamento massimo in direzione z: Nodo 6

$$u_{6,z} = \frac{q_z l^4}{8EJ_z} = -0.8333 \text{ mm}$$

Caso 5

Il quinto tutorial consiste in un'analisi modale di un edificio a telaio in legno. I risultati del programma (autovalori) sono confrontati con quelli forniti da programma di calcolo SAP2000®.

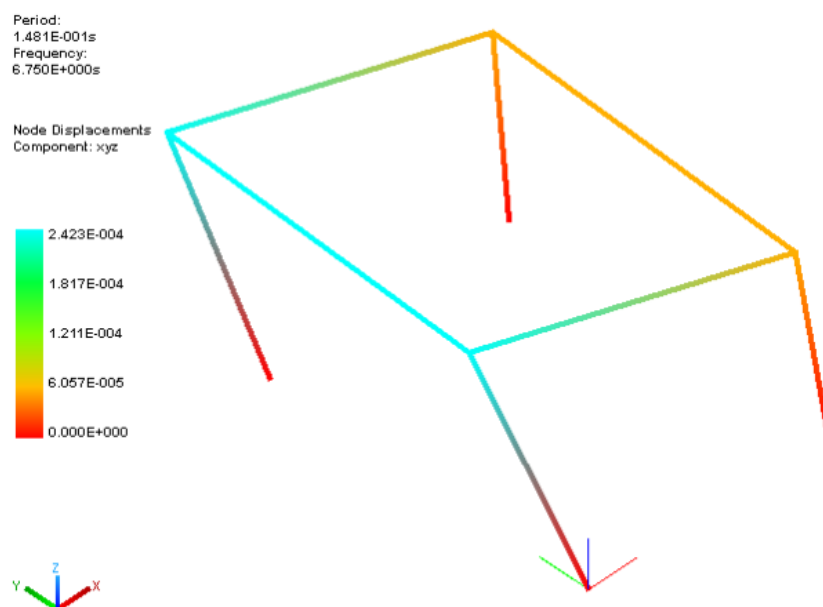


 Solo la deformabilità flessionale delle travi viene considerata.

- Unità: *N* per la forza e *mm* per la lunghezza.
- Proprietà del materiale:
 - Nome: GL24H;

- $E=9.40 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$;
- $\nu=0.3$
- Peso specifico $=3.8 \text{ kN/m}^3$;
- Densità di massa $=0.38 \text{ kN/m}^3/\text{g}$
- Proprietà della sezione:
 - $B=300 \text{ mm (z)}$;
 - $H=500 \text{ mm (y)}$;
- Geometria:
 - $L_x=3 \text{ m}$;
 - $L_y=4 \text{ m}$;
 - $L_z=2 \text{ m}$;
- Masse concentrate: in ogni nodo del primo impalcato
 - $m_y=2.5 \text{ kN/g}$;
 - $m_z=-2.5 \text{ kN/g}$;
 - $m_x=-2.5 \text{ kN/g}$

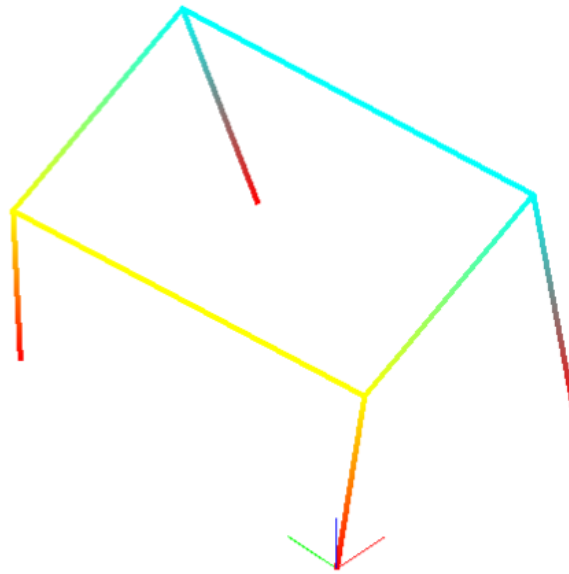
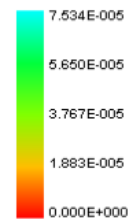
- Risultati del programma:
 - Primo modo:



- Secondo modo:

Period:
8.376E-002s
Frequency:
1.194E+001s

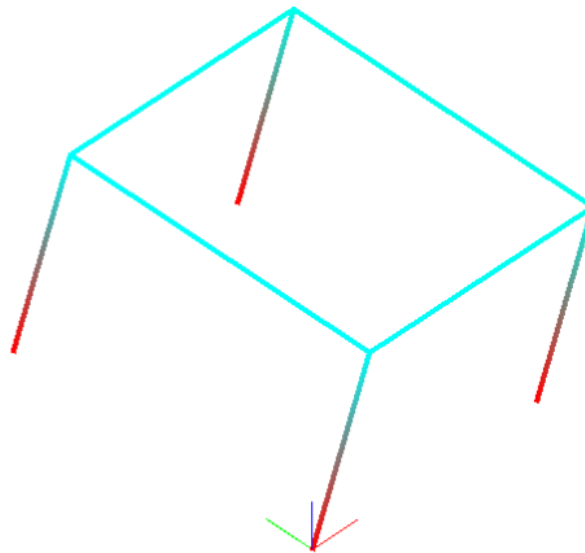
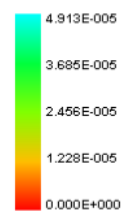
Node Displacements
Component: xyz



o Terzo modo:

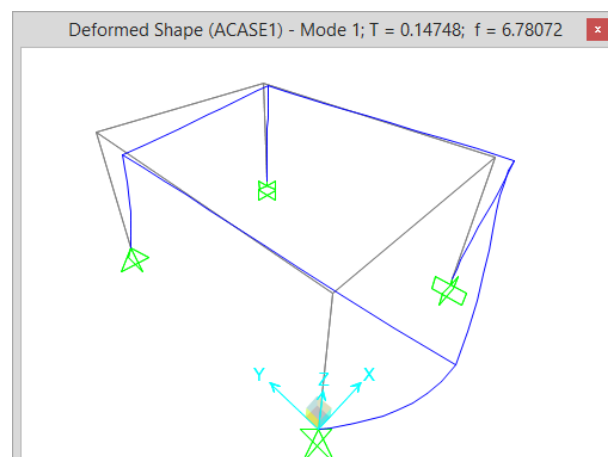
Period:
7.794E-002s
Frequency:
1.283E+001s

Node Displacements
Component: xyz

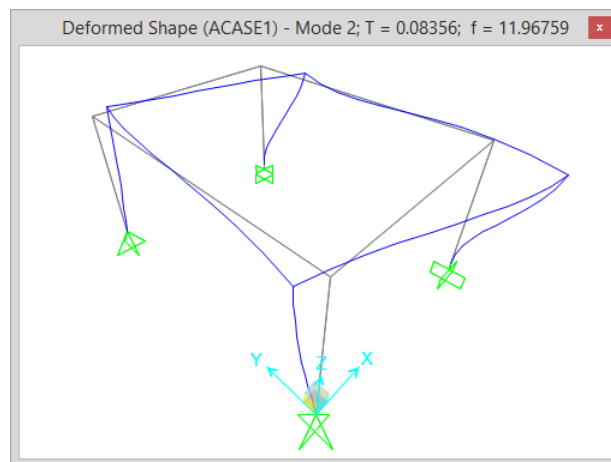


- Risultati da SAP2000® :

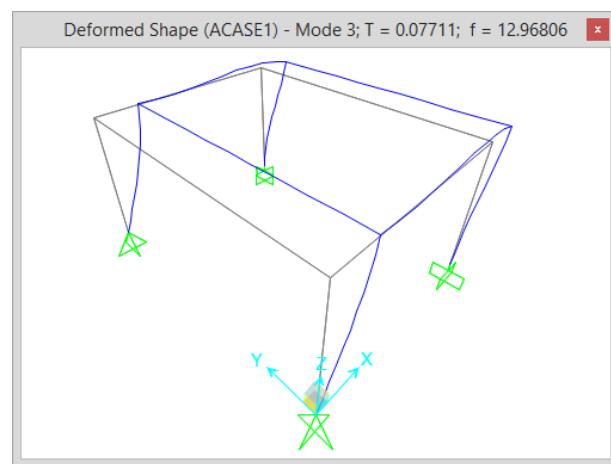
o Primo modo:



- o Secondo modo:



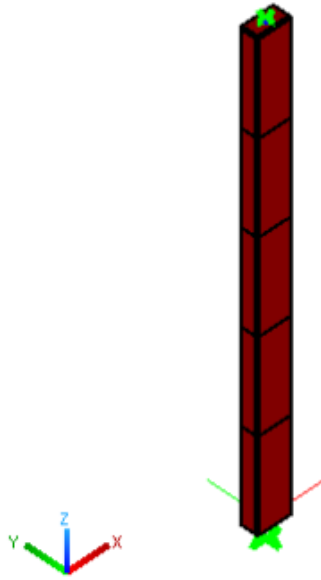
- o Terzo modo:



Nessuna differenza rilevata.

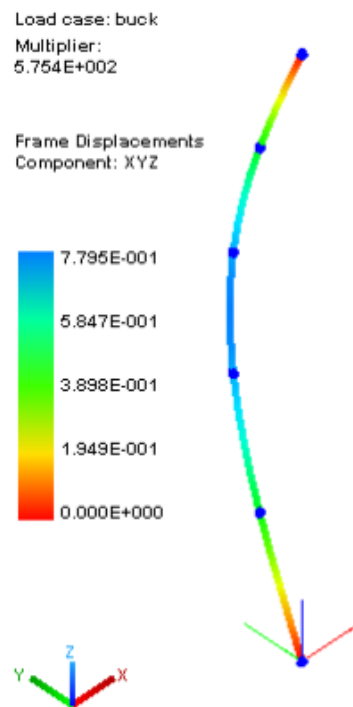
Caso 6

Il sesto **tutorial consiste in un'analisi** di buckling di una colonna in calcestruzzo in configurazione appoggio-carrello. I risultati del programma (autovalori ovvero moltiplicatori di carico) sono confrontati con i risultati calcolati con la teoria euleriana della stabilità. La colonna è suddivisa in 5 elementi di eguale lunghezza.

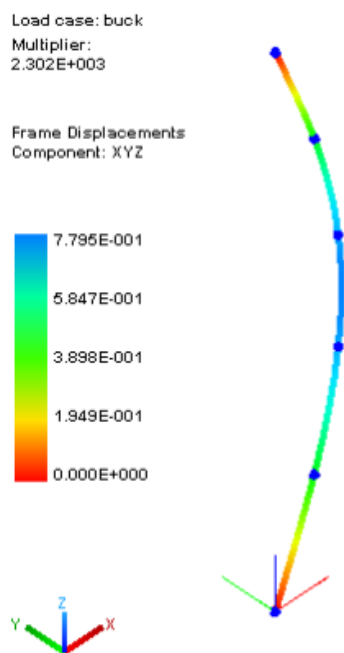


⚠ Solo la deformabilità flessionale delle travi viene considerata.

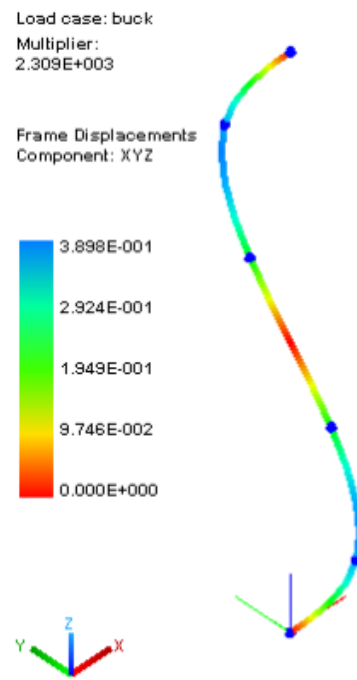
- Unità: N per la forza e mm per la lunghezza.
- Proprietà del materiale:
 - o Nome: C25/30;
 - o $E=3.15e+6 \text{ kN/m}^2$;
 - o $\nu=0.2$
 - o Peso specifico $=25 \text{ kN/m}^3$;
 - o Densità di massa $=2.5 \text{ kN/m}^3/g$
- Proprietà della sezione:
 - o $B=100 \text{ mm (z)}$;
 - o $H=200 \text{ mm (y)}$;
- Geometria:
 - o $L_{tot}=3.0 \text{ m}$;
- Carichi:
 - o $Q_z=-1 \text{ kN}$;
- Risultati del programma:
 - o Primo modo:



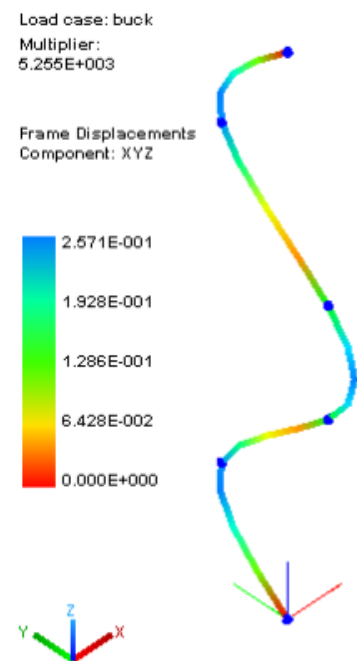
o Secondo modo:



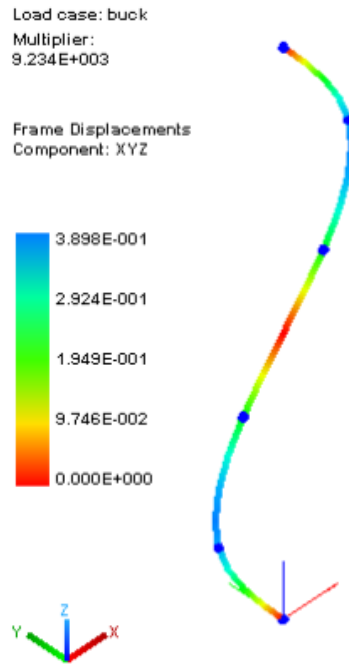
o Terzo modo:



o Quarto modo:



o Quinto modo:



- Calcolo manuale:

- o Il carico critico è calcolato come $P_{cr} = \pi^2 \frac{EJ}{(l/n)^2}$ con $n = 1, 2, 3, \dots$, e J della direzione di inflessione.
- o Inerzia della sezione:

$$J_{yy} = \frac{1}{12}hb^3 = 16.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$J_{zz} = \frac{1}{12}bh^3 = 66.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

- o Risultati teorici:

Flessione yy	Flessione zz
$\pi^2 \frac{EJ_{yy}}{l^2} = 575 \text{ kN}, \lambda = 575$	$\pi^2 \frac{EJ_{zz}}{l^2} = 2301 \text{ kN}, \lambda = 2301$
$\pi^2 \frac{EJ_{yy}}{(l/2)^2} = 2301 \text{ kN}, \lambda = 2301$	$\pi^2 \frac{EJ_{zz}}{(l/2)^2} = 9206 \text{ kN}, \lambda = 9206$
$\pi^2 \frac{EJ_{yy}}{(l/3)^2} = 5178 \text{ kN}, \lambda = 5178$	

La soluzione data dal programma è in accordo coi risultati teorici.

Capitolo 3

Verifiche per strutture in acciaio

In questo capitolo sono esplicitate le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le travi/aste di materiale acciaio.

Simboli utilizzati

A: Area
Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**
Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**
Jt: inerzia torsionale
D: diametro esterno sezione
b: base della sezione per tutte le sezioni generiche
h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche
tw: **spessore dell'anima**
tf1: spessore della flangia superiore
tf2: spessore della flangia inferiore
t: spessore delle sezioni per elementi piani
N: forza assiale
V: Taglio generico lungo un asse della sezione
Vy: Taglio lungo Y
Vz: Taglio lungo Z
Mt: Momento torcente
M: Momento generico attorno ad un asse della sezione
Myy: **Momento attorno all'asse Y**
Mzz: **Momento attorno all'asse Z**
Em: modulo di Young del materiale
Gm: modulo di taglio del materiale
Nlm: coefficiente di Poisson del materiale
fk: resistenza caratteristica del materiale
WelZ: modulo resistente in direzione Z
WelY: modulo resistente in direzione Y
WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z
WplY: modulo resistente plastico in direzione Y
iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**
iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**
imin: **raggio d'inerzia minimo**

Elenco verifiche

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave in materiale acciaio. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ ATTENZIONE: le verifiche riportate non supportano sezioni di classe 4.

Valutazione della classe della sezione

Conservativamente, la classe di ogni sezione è valutata come la massima classe fra tutte le parti della sezione considerate puramente compresse.

Tipo sezione	Parte	Rapporto	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Rettangolari		/			<i>sempre</i>
Doppio T, T, C	anima	$0.9(h-tf1)/tw$	33ε	38ε	42ε
	ali	$0.9(b/2-tw)/tf1$	9ε	10ε	14ε
Angolari	anima	h_{max}/te			15ε
	ali	$(b+h)/(2te)$			11.5ε
Box	anima	$(h-2te)/te$	9ε	10ε	14ε
	ali	$(b-2te)/te$	9ε	10ε	14ε
Tubi		D/te	$50\varepsilon^2$	$70\varepsilon^2$	$90\varepsilon^2$
Barre		/		<i>sempre</i>	
Generiche		/			<i>sempre</i>

con $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Il nome della colonna nel programma viene presentato fra parentesi (es. *(StabilitàEuleriana)*).

Trazione/compressione (Assiale)

In trazione:

$$\rho_N = \frac{N}{N_{Rd}} = \frac{N}{\frac{Af_{yk}}{\gamma_{M0}}}$$

In compressione (stabilità euleriana):

$$\rho_{Nb} = \frac{N}{N_{b,Rd}} = \frac{N}{\frac{\chi_{\min} Af_{yk}}{\gamma_{M1}}}$$

con χ_{\min} ottenuto da paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC2018. Le curve di instabilità sono scelte concordemente alla seguente tabella e sono determinate per sezioni lamine:

Tipo sezione	α_y	α_z	α_{LT}
Rettangolari	0.49	0.49	0.76
Doppio T, I	da 0.21 a 0.76	da 0.21 a 0.76	da 0.34 a 0.49
Angolari, C, T	0.49	0.49	0.76
Box	0.49	0.49	0.76

Tubi	0.49	0.49	0.76
Barre	0.49	0.49	0.76
Generiche	-	-	-

Taglio semplice (Taglio)

$$\rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{\frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}}$$

Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{\alpha_{PL} \cdot W \cdot f_{yk} \cdot \cos(\rho_N)} = \frac{M}{M_{Rd} \cdot \cos(\rho_N)} \quad \text{se il taglio sollecitante non supera il 30\% di quello resistente plastico}$$

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{M_{Rd,red}} \quad , \text{ con } M_{Rd,red} = M_{Rd} \left(1 - \min \left((2\rho_V - 1)^2, 1 \right) \right) \quad \text{se il taglio sollecitante supera il 50\% di quello resistente, } M_{Rd,red} = M_{Rd} \text{ altrimenti.}$$

Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)

Se l'elemento è compresso, le verifiche a instabilità sono eseguite secondo la procedura semplificata A delle NTC2018.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \quad \text{con } r_{ridN_{cr}} = 1 - \frac{\rho_N \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M0}}$$

Se l'elemento è teso:

$$\rho_{MNb} = \rho_N + \rho_{M_y} + \rho_{M_z}$$

Flesso-torsione (Flesso_torsione)

⚠ ATTENZIONE: Questa verifica non è eseguita per le sezioni tubolari di ponteggio.

$$\rho_{MTb} = \frac{M}{M_{b,Rd}} = \frac{M}{\frac{\chi_{LT} A \cdot W_{pl} \cdot f_k}{\gamma_{M1}}}$$

Per la flesso-torsione, il momento torcente di secondo ordine (contributo alla Vlasov) è sempre trascurato:

$$M_{cr} = \psi \frac{\pi}{L_{0b}} \sqrt{EI_y \cdot GI_T} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{0b}} \right)^2 \cdot \frac{EI_\omega}{GI_T}} \quad \text{con } I_\omega = 0$$

eccetto che per i seguenti tipi di sezione:

- Doppio T, I:
$$I_{\omega} = \frac{(h-t_f)^2}{4} I_y$$
- a C:
$$I_{\omega} = \frac{(h-t_f)^2 \cdot b^3 \cdot t_f}{12} \cdot \frac{2F+3}{F+6} \quad \text{con } F = \frac{h-t_f}{b}$$

Nel calcolo del momento critico, il coefficiente ψ viene forzato al valore di 1.127 se la trave presenta momenti nulli alle estremità. In ogni caso non può superare il valore di 1.285.

Flesso-torsione combinata (Flessotors_comb)

La verifica viene svolta secondo NTC2018, C4.2.4.1.3.3.1 Metodo A.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \quad \text{e} \quad \rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} \quad (\text{per sezioni ruotate})$$

Verifiche di deformabilità

Verifica di deformabilità delle membrature (Inflessione)

$$\rho_f = \frac{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}}{defLimit}$$

⚠ ATTENZIONE: *defLimit* viene settato prima dell'inizio delle verifiche, separatamente per travi e colonne. Di default i valori sono di 1/250 per le travi (*defTR*) e di 1/300 per le colonne (*defCOL*)

Verifiche acciaio secondo NTC2008	
Deformabilità massima travi	
defTR	0.004
Deformabilità massima colonne	
defCOL	0.00333

Verifiche da analisi non lineare

L'analisi statica non lineare di pushover consta di una verifica globale (eseguita nel piano ADRS dalla maschera *Estrai Dati*) e dalle verifiche locali dei meccanismi duttili (flessione) e fragili (taglio).

Per le strutture in acciaio, è necessario dapprima verificare globalmente la struttura (pulsante *Metodo N2* da *Estrai Dati*, alla voce *Taglio di base X/Y VS. spost. X/Y*). Una volta determinato in questo modo il Performance Point della curva, e quindi la domanda in spostamento, verrà automaticamente trovato il punto della curva più vicino. In questo punto saranno svolte le verifiche locali duttili e fragili, direttamente sui dati forniti dalle cerniere.

The image shows two windows from a structural analysis software. The top window, 'Estrai dati dai risultati', displays a list of data types on the left, including 'pushoverX', 'modal', 'ULS', 'seismW', 'pp', 'perm', and 'var'. The 'pushoverX' case is selected. The 'Seleziona il tipo di dati' list includes 'Temperatura solidi', 'Fattori di partecipazione', 'Rapporti massa part.', 'Periodi', 'Forza VS spost. Molle', 'Forza VS spost. Cerniere', 'Taglio di base X VS spost. X', 'Taglio di base Y VS spost. Y', 'Taglio di base Z VS spost. Z', 'Stress nodali', 'Forze nodali shell', 'Temperature nodali', and 'Peso amature'. The 'Taglio di base X VS spost. X' option is selected. The 'Seleziona tempo o modo' list shows various time values, with '1.2706654' selected. The 'Seleziona il tipo di risultato' list is empty. The 'Numero' field is empty. The 'Tutti' and 'Pulisci' buttons are visible. The 'Seleziona in vista' button is also present. The 'Trova:' field is empty. The 'Vai' button is visible. The 'Stazioni/punti' field is empty. The 'Tempo/Modo' table shows the following data:

Tempo/Modo	Spostamento	Valore
2-X	m*	1.010E+002
2-X	Fpart	1.207E+000
2-X	T*	9.803E-001
2-X	Tc*	4.000E-001
2-X	d*	5.684E-002

The 'ADRS' graph shows the relationship between Sa [m/s^2] and Sd [m]. The curve is labeled 'PP(5.684e-2, 2.335e0)'. The bottom window, 'Verifiche', shows the 'Impostazioni di verifica' section with the following settings: 'sulle seguenti quantità' set to 'Risultati da elementi', 'per il caso di carico' set to 'pushoverX', 'per tempo/modo' set to '1.2706654', 'Solo I e J' selected, 'Set di verifiche' set to 'Steel Hinge EC3', and 'Verifiche acciaio secondo NTC2008'. The 'Stato Limite SLO 1-SLD 2-SLV 3-SLC 4' table shows 'SL' set to '3'. The 'Risultati testuali su oggetto selezionato' section is empty. The 'Lancia verifica' section has 'Esegui verifiche' and 'Esporta tabella...' buttons. The 'Verifica' section has 'Esegui verifiche', 'Ricarica verifiche salvate', and 'Esporta tabella...' buttons. The 'Testa verifica su un solo elemento' checkbox is unchecked. The 'Mostra solo non verificate' checkbox is unchecked. The 'Evidenzia nel viewport' checkbox is unchecked. The 'Accuratezza risultati' is set to '0.00000000'. The 'Chiudi' button is visible.

Per svolgere le verifiche, dalla maschera *Verifiche* selezionare nell'ordine:

- Il caso di carico di pushover
- Le stazioni "Solo I e J"
- Il set di verifica "Steel_Hinge_EC3"
- Lo stato limite di riferimento. Di default è SLV
- Opzionalmente, aumentare l'accuratezza risultati, per evidenziare eventuali rapporti D/C molto bassi.

Se la verifica globale è stata eseguita correttamente, il menu "tempo/modo" viene compilato con il punto della curva rappresentante la domanda di spostamento (nell'immagine, $t=1.2706$).

La verifica per l'acciaio restituisce:

- il rapporto fra il taglio sollecitante e quello resistente, per entrambe le direzioni locali della trave Y e Z;
- il rapporto fra rotazione della singola cerniera e quella alla corda massima associata al singolo elemento secondo C8.7.2.4 Circ.7/2019.

Stato Limite	Classe	
	1	2 o sup.
SLO	$2/3 \vartheta_y$	$1/6 \vartheta_y$
SLD	ϑ_y	$1/4 \vartheta_y$
SLV	$6 \vartheta_y$	$2 \vartheta_y$
SLC	$8 \vartheta_y$	$3 \vartheta_y$

con $\vartheta_y = \frac{M_{el} L_v}{2EJ}$

in cui M_{el} è il momento resistente elastico, L_v è la luce di taglio, E il modulo di Young e J il momento d'inerzia nella direzione di calcolo.

Le cerniere plastiche sono definite secondo le seguenti quantità.

DoF locale	Azione associata	Resistenza	Duttilità
1	N (trazione)	$\frac{f_k}{\gamma_{m0}} A$	5
1	N (compressione)	Nrd da stabilità	1
2	Vy	Vrd corrispondente	1
3	Vz	Vrd corrispondente	1
4	Mt	$\frac{f_k}{\gamma_{m0}} \frac{2J_t}{h}$	1
5	Myy	Mrd corrispondente	8
6	Mzz	Mrd corrispondente	8

Per analisi cicliche, le cerniere plastiche seguono un ciclo elasto-plastico.

Capitolo 4

Verifiche per strutture in alluminio

In questo capitolo sono esplicitate le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le travi/aste di materiale alluminio (lega di alluminio). Queste tipologie di verifiche fanno riferimento alla norma UNI EN 1999-1-1 (Eurocodice 9) aggiornamento 2023.

Simboli utilizzati

A: Area
Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**
Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**
Jt: inerzia torsionale
D: diametro esterno sezione
b: base della sezione per tutte le sezioni generiche
h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche
tw: **spessore dell'anima**
tf1: spessore della flangia superiore
tf2: spessore della flangia inferiore
t: spessore delle sezioni per elementi piani
N: forza assiale
V: Taglio generico lungo un asse della sezione
Vy: Taglio lungo Y
Vz: Taglio lungo Z
Mt: Momento torcente
M: Momento generico attorno ad un asse della sezione
My: **Momento attorno all'asse Y**
Mz: **Momento attorno all'asse Z**
Em: modulo di Young del materiale
Gm: modulo di taglio del materiale
Nlm: coefficiente di Poisson del materiale
fk: resistenza caratteristica del materiale
WelZ: modulo resistente in direzione Z
WelY: modulo resistente in direzione Y
WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z
WplY: modulo resistente plastico in direzione Y
iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**
iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**
imin: **raggio d'inerzia minimo**

Elenco verifiche

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave in materiale alluminio. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ ATTENZIONE: le verifiche riportate non supportano sezioni di classe 4.

⚠ ATTENZIONE: nella lista di materiali *Alloy* nel programma sono riportate le leghe di alluminio più utilizzate. Prestare attenzione alle sigle per la scelta del materiale al fine di selezionare la lega più adatta agli elementi utilizzati.

SH - Lamiera (EN 485)

ST - Nastro (EN 485)

PL - Piastra (EN 485)

ET - Tubo estruso (EN 755)

EP - Profilati estrusi (EN 755)

ER/B - Tondi e barre estrusi (EN 755)

DT - Tubo trafilato (EN 754)

FO - Fucinati (EN 586)

Valutazione della classe della sezione

Conservativamente, la classe di ogni sezione è valutata come la massima classe fra tutte le parti della sezione considerate puramente compresse (t_e significa spessore della sezione).

Tipo sezione	Parte	Rapporto	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Rettangolari		/			<i>sempre</i>
Doppio T, T, C	anima	$0.9(h-tf1)/t_w$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
	ali	$0.9(b/2-t_w)/t_{f1}$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
Angolari	anima	h_{max}/t_e			$\beta 3$
	ali	$(b+h)/(2t_e)$			$\beta 3$
Box	anima	$(h-2t_e)/t_e$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
	ali	$(b-2t_e)/t_e$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
Tubi*		$3\sqrt{D/t_e}$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
Barre		/		<i>sempre</i>	
Generiche		/			<i>sempre</i>

I valori $\beta 1$, $\beta 2$, $\beta 3$ vengono calcolati considerando i rapporti β/ϵ , riportati nella tabella sottostante, moltiplicati per il parametro ϵ definito come segue:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$$

Per le ali delle sezioni si fa riferimento ai coefficienti per le parti esterne, per le anime e pareti delle sezioni si fa invece riferimento ai coefficienti per le parti interne.

La normativa prevede coefficienti diversi per sezioni saldate e non saldate. La classificazione delle sezioni è stimata assumendo di default le sezioni senza saldature. È possibile forzare la variabile *welded*=1 prima di eseguire le verifiche per considerare tutte le sezioni come saldate. Per forzare la verifica per sezioni saldate SOLO alle estremità delle travi, settare la variabile *weldedEnds*=1.

⚠ ATTENZIONE: per la verifica delle sezioni saldate, la procedura utilizza il valore f_0 dalla libreria *Alloy* del programma. Nel caso venisse utilizzato un materiale non di libreria, aggiungere la riga " $f_0HAZ=xxx$ " nella casella di testo della maschera *Verifiche*, con f_0HAZ in MPa.

	Classe di durabilità	Parte interna			Parte esterna		
		$\beta 1/\varepsilon$	$\beta 2/\varepsilon$	$\beta 3/\varepsilon$	$\beta 1/\varepsilon$	$\beta 2/\varepsilon$	$\beta 3/\varepsilon$
senza saldature	A	12.44	16	22	4	4.5	6
	B	12.44	16	20	4	4.5	5.5
	C	12.44	16	18	4	4.5	5
con saldature	A	9.95	13	18	3.2	4	5
	B	9.95	13	16.5	3.2	3.8	4.5
	C	9.95	13	15	3.2	3.5	4

Il nome della colonna nel programma viene presentato fra parentesi (es. *(StabilitàEuleriana)*). Nelle seguenti formule si fa riferimento a f_0 (o f_{0HAZ}) come f_{yk} .

Trazione/compressione (Assiale)

In trazione:

$$\rho_N = \frac{N}{N_{Rd}} = \frac{N}{\frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}}$$

In compressione (stabilità euleriana):

$$\rho_{Nb} = \frac{N}{N_{b,Rd}} = \frac{N}{\frac{\chi_{\min} A f_{yk}}{\gamma_{M1}}}$$

con χ_{\min} ottenuto da paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC2018. Le curve di instabilità sono scelte concordemente alla lega di alluminio selezionata, concordemente a quanto previsto dal paragrafo 8.5 dell'Eurocodice 9.

Taglio semplice (Taglio)

$$\rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{\frac{A_v f_{yk}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}}$$

Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{\alpha_{PL} \cdot W \cdot f_{yk} \cdot \cos(\rho_N)} = \frac{M}{M_{Rd} \cdot \cos(\rho_N)} \quad \text{se il taglio sollecitante non supera il 30\% di quello resistente plastico}$$

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{M_{Rd,red}} \quad , \quad \text{con } M_{Rd,red} = M_{Rd} \left(1 - \min \left((2\rho_V - 1)^2, 1 \right) \right) \quad \text{se il taglio sollecitante supera il 50\% di quello resistente, } M_{Rd,red} = M_{Rd} \text{ altrimenti.}$$

Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)

Se l'elemento è compresso, le verifiche a instabilità sono eseguite secondo la procedura semplificata A delle NTC2018.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \quad \text{con } r_{ridN_{cr}} = 1 - \frac{\rho_N \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M1}}$$

Se l'elemento è teso:

$$\rho_{MNb} = \rho_N + \rho_{M_y} + \rho_{M_z}$$

Flesso-torsione (Flesso_torsione)

 **ATTENZIONE:** Questa verifica non è eseguita per le sezioni tubolari di ponteggio.

$$\rho_{MTb} = \frac{M}{M_{b,Rd}} = \frac{M}{\frac{\chi_{LT} A \cdot W_{pl} \cdot f_k}{\gamma_{M1}}}$$

Per la flesso-torsione, il momento torcente di secondo ordine (contributo alla Vlasov) è sempre trascurato:

$$M_{cr} = \psi \frac{\pi}{L_{0b}} \sqrt{EI_y \cdot GI_T} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{0b}} \right)^2 \cdot \frac{EI_\omega}{GI_T}} \quad \text{con } I_\omega = 0$$

eccetto che per i seguenti tipi di sezione:

- Doppio T, I: $I_\omega = \frac{(h - t_f)^2}{4} I_y$
- a C: $I_\omega = \frac{(h - t_f)^2 \cdot b^3 \cdot t_f}{12} \cdot \frac{2F + 3}{F + 6} \quad \text{con } F = \frac{h - t_f}{b}$

Nel calcolo del momento critico, il coefficiente ψ viene forzato al valore di 1.127 se la trave presenta momenti nulli alle estremità. In ogni caso non può superare il valore di 1.285. I valori relativi alle curve di instabilità sono desunti dal paragrafo 8.5 dell'Eurocodice 9.


Flesso-torsione combinata (Flessotors_comb)

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \quad \text{e} \quad \rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}}$$

Verifiche di deformabilità

Verifica di deformabilità delle membrature (Inflessione)

$$\rho_f = \frac{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}}{defLimit}$$

 **ATTENZIONE:** *defLimit* viene settato prima dell'inizio delle verifiche, separatamente per travi e colonne. Di default i valori sono di 1/250 per le travi (*defTR*) e di 1/300 per le colonne (*defCOL*)

Verifiche leghe di alluminio secondo Eurocodice
9

Deformabilità massima travi		▲
defTR	0.004	
Deformabilità massima colonne		
defCOL	0.00333	
Sezioni saldate [0/1]		
welded	0	
Estremità travi saldate [0/1]		
weldedEnds	0	▼

Capitolo 5

Verifiche per strutture in calcestruzzo armato

In questo capitolo sono descritte le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le membrature in calcestruzzo armato.

Simboli utilizzati

A: Area

Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**

Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**

Jt: inerzia torsionale

D: diametro esterno sezione

b: base della sezione per tutte le sezioni generiche

h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche

tw: **spessore dell'anima**

tf1: spessore della flangia superiore

tf2: spessore della flangia inferiore

t: spessore delle sezioni per elementi piani

N: forza assiale

V: Taglio generico lungo un asse della sezione

Vy: Taglio lungo Y

Vz: Taglio lungo Z

Mt: Momento torcente

M: Momento generico attorno ad un asse della sezione

Myy: **Momento attorno all'asse Y**

Mzz: **Momento attorno all'asse Z**

Em: modulo di Young del materiale

Gm: modulo di taglio del materiale

Nlm: coefficiente di Poisson del materiale

fk: resistenza caratteristica del materiale

WelZ: modulo resistente in direzione Z

WelY: modulo resistente in direzione Y

WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z

WplY: modulo resistente plastico in direzione Y

iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**

iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**

imin: **raggio d'inerzia minimo**

bwY: larghezza minima della sezione in direzione locale y

bwZ: larghezza minima della sezione in direzione locale z

ds: altezza utile della sezione

Astot: area totale di armatura in sezione

AsTens: area di armatura tesa

fyks: resistenza caratteristica armatura a taglio (staffe)

fydl: resistenza di progetto delle barre longitudinali

rebCmin: distanza minima fra bordo e centro armatura longitudinale

isWall: pari a 1 se la sezione è di una parete, 0 altrimenti

AmbCondition: condizioni ambientali per verifiche in esercizio (1,2,3)

mNt: duttilità a trazione della sezione per cerniere plastiche

mNc: duttilità a compressione per cerniere plastiche

mVy: duttilità a taglio in direzione locale y per cerniere plastiche

mVz: duttilità a taglio in direzione locale z per cerniere plastiche

mMt: duttilità torsionale per cerniere plastiche

mMy: duttilità a flessione attorno all'asse locale y per cerniere plastiche

mMz: duttilità a flessione attorno all'asse locale z per cerniere plastiche

NbH: resistenza massima a compressione elemento per cerniere plastiche

MtH: resistenza a torsione al limite elastico per cerniere plastiche.

Elenco verifiche

Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ AVVISIO: le seguenti verifiche coprono solo le combinazioni statiche. Le verifiche sismiche delle membrature in c.a. non sono ancora supportate.

Verifiche statiche - Stati limite ultimi

Stabilità in compressione

$$\rho_{slend} = \frac{\max\left(\frac{L_{0y}}{i_y}, \frac{L_{0z}}{i_z}\right)}{25} \cdot \sqrt{\frac{|N|}{A \cdot f_{cd}}}$$

Taglio per elementi non armati

Per ogni direzione locale y e z:

$$V_{rd} = \max \left\{ \left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot (100 \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b_w \cdot ds, (\nu_{\min} + 0.15 \sigma_{cp}) b_w \cdot ds \right\}$$

con

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{ds}} \leq 2 \quad \nu_{\min} = 0.035 k^{1.5} f_{ck}^{0.5} \quad \rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot ds} \quad \sigma_{cp} = \min \left(\frac{N}{A_{cls}}, 0.2 f_{cd} \right)$$

Taglio per elementi armati

Per ogni direzione locale y e z:

$$V_{Rsd} = 0.9d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\cot \alpha + \cot \theta) \sin \alpha$$

$$V_{Rcd} = 0.9d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot 0.5 f_{cd} \frac{(\cot \alpha + \cot \theta)}{(1 + \cot^2 \theta)}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

α_c	coefficiente maggiorativo pari a	1	per membrane non compresse
		$1 + \sigma_{cp}/f_{cd}$	per $0 \leq \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd}$
		1,25	per $0,25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$
		$2,5 (1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$	per $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$

Tenso/presso/flessione

La verifica a flessione, sia semplice che deviata, viene condotta sulla scorta del dominio resistente calcolato per lo sforzo assiale N corrente.

Torsione

La quantità $\cot \theta$ è assunta pari al minimo fra le 2 direzioni locali y e z.

$$T_{Rcd} = 2A \cdot t_t \cdot 0.5 f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta}{(1 + \cot^2 \theta)} \quad \text{con} \quad t_t = \max \left(\frac{A}{per}, 2 \cdot rebCmin \right)$$

$$T_{Rsd} = 2A \frac{A_{sw}}{s} f_{yds} \cot \theta$$

$$T_{Rld} = 2A \frac{A_{stot}}{per - \pi \cdot t_t} \cdot \frac{f_{ydl}}{\cot \theta}$$

$$T_{Rd} = \min(T_{Rcd}, T_{Rsd}, T_{Rld})$$

Torsione e taglio

Il rapporto fra i tagli è il massimo fra le 2 direzioni locali y e z.

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1$$

Verifiche statiche - Stati limite di esercizio

Fessurazione

Data la classe di esposizione del calcestruzzo, la variabile *AmbCondition* può assumere i valori 1 per condizioni ordinarie, 2 per aggressive o 3 per molto aggressive.

Tab. 4.1.III – Descrizione delle condizioni ambientali

Condizioni ambientali	Classe di esposizione
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

La condizione ambientale serve al calcolo della fessurazione dell'elemento. La verifica viene eseguita senza calcolo diretto usando le seguenti tabelle:

Tabella C4.1.II Diametri massimi delle barre per il controllo di fessurazione

Tensione nell'acciaio σ_s [MPa]	Diametro massimo ϕ delle barre (mm)		
	$w_3 = 0,4$ mm	$w_2 = 0,3$ mm	$w_1 = 0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	-

Tabella C4.1.III Spaziatura massima delle barre per il controllo di fessurazione

Tensione nell'acciaio σ_s [MPa]	Spaziatura massima s delle barre (mm)		
	$w_3 = 0,4$ mm	$w_2 = 0,3$ mm	$w_1 = 0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

I valori di diametro massimo così ricavati vengono corretti per il particolare materiale impiegato e lo stato tensionale corrente in accordo con le seguenti relazioni.

Flessione (almeno una parte della sezione è compressa):

$$\phi_s = \phi_s^*(f_{ct,eff}/2,9) \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (7.6N)$$

Trazione (la sezione è tutta tesa):

$$\phi_s = \phi_s^*(f_{ct,eff}/2,9) h_{cr}/(8(h-d)) \quad (7.7N)$$

Le quantità di verifica sono

$$rebarDiameterRatio = \max \left(\frac{\phi_i}{\phi_{s,i}} \right) \text{ per ogni barra } i$$

$$rebarSpacingRatio = \max \left(\frac{s_i}{s_{s,i}} \right) \text{ per ogni barra } i$$

Il valore finale usato in verifica è

$$fessurazione = \max(rebarDiameterRatio, rebarSpacingRatio)$$

Deformazione degli elementi

La deformabilità limite delle travi *defTR* può essere impostata dall'utente.

# Verifica sezioni CA NTC2018	
Condizioni ambientali	
AmbCondition	1
Deformabilità massima travi	
defTR	1/250

La verifica di deformabilità viene effettuata come

$$defl = \sqrt{dy^2 + dz^2}$$

$$\rho_{Def} = \frac{defl}{L} \frac{1}{defTR}$$

Tensioni di esercizio nei materiali

La verifica tensionale lato acciaio e lato calcestruzzo, per le combinazioni Rara (Caratteristica) e Quasi Permanente sono espresse come:

$$\sigma_{limC} = 0.45 f_k, \sigma_{limS} = 0.6 f_k$$

$$\rho_{StressC} = |S_{maxCls}| / \sigma_{limC}$$

$$\rho_{StressS} = |S_{maxReb}| / \sigma_{limS}$$

Dettagli costruttivi

Area delle armature

Le aree totali a trazione e a compressione sono confrontate singolarmente con il valore limite di **0.04A_c**. Questa verifica ha come risultato Vero o Falso.

Verifiche sismiche

Le verifiche sismiche vengono svolte quando il set "NTCsismica_CA" è selezionato. Questo set di verifiche contiene tutte le verifiche statiche e aggiunge le ulteriori prescrizioni per le strutture in zona sismica.

L'utente deve indicare:

- La classe di duttilità: A=1, B=2, classe B senza verifiche dei nodi=3
- Per le verifiche di duttilità: il fattore di comportamento q_0 , il periodo T_c dello spettro di progetto; il periodo fondamentale da considerare nella verifica T_1 .

Classe di duttilità (A:1,B:2,escludi nodi:3)	
CD	2
Fattore di comportamento	
q_0	1.5
Periodo T_c dello spettro	
T_c	0.4
Periodo fondamentale	
T_1	0.5

Verifiche geometriche

$$b \geq 20cm$$

Per le travi: $\frac{b}{h} \geq 0.25$

Per le colonne: $\min(b, h) \geq 25cm$

Per i setti: $t \geq 15cm$

Verifica di duttilità

La verifica in duttilità viene svolta per le sezioni di travi e pilastri all'interno della zona critica. La domanda di duttilità allo SLC viene valutata come:

$$\mu_\phi = \begin{cases} 1,2 \cdot (2q_0 - 1) & \text{per } T_1 \geq T_c \\ 1,2 \cdot \left(1 + 2(q_0 - 1) \frac{T_c}{T_1} \right) & \text{per } T_1 < T_c \end{cases} \quad [7.4.3]$$

Con i simboli specificati a inizio paragrafo. Tale verifica, da attuarsi quando non sia prevista o possibile l'applicazione dei dettagli costruttivi di norma e si usi $q > 1.5$ (struttura dissipativa, §7.4.4.1.2), è regolata dall'applicazione della relazione riportata al § 4.1.2.3.4.2.

$$\phi_{yd} = \frac{M_{Rd}}{M'_{yd}} \cdot \phi'_{yd}$$

in cui M'_{yd} e ϕ'_{yd} sono rispettivamente momento e curvatura convenzionale secondo NTC2018.

Taglio

All'interno delle zone critiche, si impone $ctg(\theta) = 1$.

Il taglio sollecitante viene sovrascritto se si applica la gerarchia delle resistenze.

Rapporto di compressione dei pilastri (RappComprPil)

$$\frac{N_{Ed}}{f_{cd} A_{cl}} \text{ con } crc = 0.55 \text{ per la classe di duttilità A, } 0.65 \text{ altrimenti.}$$

Verifica dei nodi

Per strutture nuove, la verifica è svolta secondo §7.4.4.3.1 delle NTC2018:

$$\frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \geq \frac{[V_{jbd} / (b_j \cdot h_{jc})]^2}{f_{ctd} + v_d \cdot f_{cd}} - f_{ctd} \quad [7.4.10]$$

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{Rd} \cdot (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yd} \cdot (1 - 0.8v_d) \quad \text{per nodi interni} \quad [7.4.11]$$

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{Rd} \cdot A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot (1 - 0.8v_d) \quad \text{per nodi esterni} \quad [7.4.12]$$

Per le strutture esistenti, se viene specificato un fattore di confidenza maggiore di 1 ($FC > 1$), vengono eseguite le verifiche in termini di tensione:

per la resistenza a trazione:

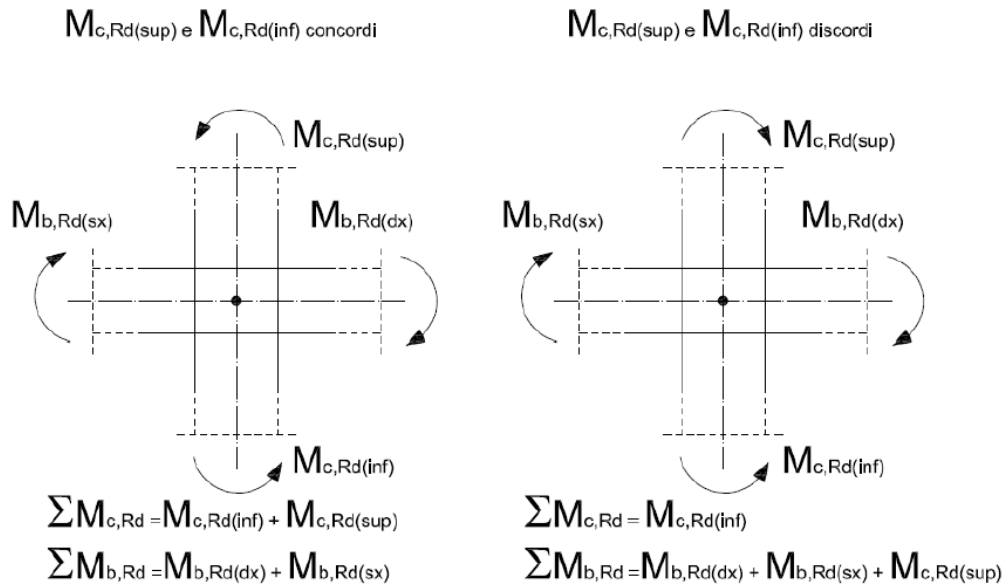
$$\sigma_{jt} = \left| \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} \right| \leq 0.3\sqrt{f_c} (f_c \text{ in MPa}) \quad [C8.7.2.11]$$

per la resistenza a compressione:

$$\sigma_{jc} = \frac{N}{2A_j} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} \leq 0.5f_c (f_c \text{ in MPa}) \quad [C8.7.2.12]$$

Gerarchia delle resistenze

La gerarchia delle resistenze per i pilastri viene applicata come descritto del seguito.



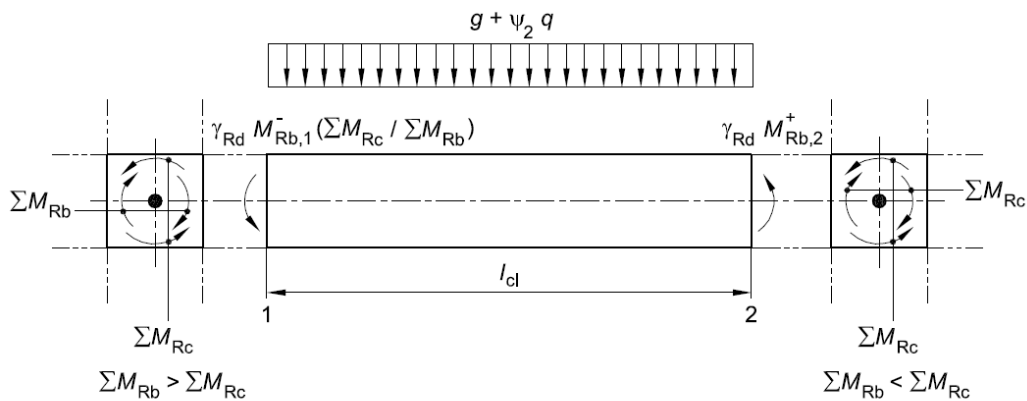
$$\Sigma M_{c,Rd} \geq \gamma_{Rd} \cdot \Sigma M_{b,Rd} \quad [7.4.4]$$

Per la verifica a presso-flessione:

$$V_{Ed} l_p = \gamma_{Rd} (M_{i,d}^s + M_{i,d}^i) \quad [7.4.5]$$

Per la verifica a taglio:

Per le travi, il taglio di progetto viene calcolato con il seguente schema:



Per le pareti, viene effettuata la traslazione dei momenti M_z della lunghezza h_{cr} (altezza della zona dissipativa) e l'amplificazione del taglio pari a q_0 .

Particolari costruttivi - travi

Armatura longitudinale (Area Acciaio)

$$\frac{1,4}{f_{yk}} < \rho < \rho_{comp} + \frac{3,5}{f_{yk}} \quad [7.4.26]$$

Inoltre, $\rho_{comp} \geq 0.25\rho$ e, nelle zone dissipative (estremi trave), $\rho_{comp} \geq 0.5\rho$.

Diametro longitudinale (DiamLong)

$$\frac{\max(D_i)}{h \cdot \alpha_{BL}}, \text{ con}$$

$$\alpha_{bL} = \begin{cases} \frac{7,5 \cdot f_{ctm}}{\gamma_{Rd} \cdot f_{yd}} \cdot \frac{1 + 0,8v_d}{1 + 0,75k_D \cdot \rho_{comp}/\rho} & \text{per nodi interni} \\ \frac{7,5 \cdot f_{ctm}}{\gamma_{Rd} \cdot f_{yd}} \cdot (1 + 0,8v_d) & \text{per nodi esterni} \end{cases} \quad [7.4.27]$$

dove:

v_d è la forza assiale di progetto normalizzata;

k_D vale 1 o 2/3, rispettivamente per CD''A'' e per CD''B'';

γ_{Rd} vale 1,2 o 1, rispettivamente per CD''A'' e per CD''B''.

Diametro staffe (DiamStaffe)

$$\frac{6}{D_{staffe,mm}}$$

Passo staffe (PassoStaffe)

$$\frac{s}{\min\left(\frac{d}{4}, 175mm \text{ o } 225mm, 24D_{staffe}, 6D \text{ o } 8D\right)} \text{ a seconda della classe di duttilità "A" o "B"}$$

Particolari costruttivi – pilastri

Armatura longitudinale (AreaAcciaio)

$$1\% \leq \rho \leq 4\% \quad [7.4.28]$$

Distanza barre longitudinali (DistanzaLong)

$$\frac{\text{distanza}_{barre}}{25cm}$$

Diametro staffe (DiamStaffe)

$$\frac{\max\left(6mm, 0.4D_{max} \sqrt{\frac{f_{ydl}}{f_{ydst}}}\right) \text{ o } 6mm}{D_{staffe,mm}} \text{ a seconda della classe di duttilità "A" o "B"}$$

Passo staffe (PassoStaffe)

$$\frac{s}{\min(0.33 \min(b, h) \text{ o } 0.5 \min(b, h), 125mm \text{ o } 175mm, 6D \text{ o } 8D)} \text{ a seconda della classe di duttilità "A" o "B"}$$

Particolari costruttivi – setti

Armatura longitudinale (AreaAcciaio)

$$\rho \geq 0.2\%$$

Diametro longitudinale (DiamLong)

$$\frac{\max(D_i)}{0.1t}$$

Distanza barre longitudinali (DistanzaLong)

$$\frac{\text{distanza}_{\text{barre}}}{30\text{cm}}$$

Verifica a taglio nel piano per scorrimento delle pareti (Scorrimento)

La resistenza è il minimo fra:

$$V_{dd} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,3 \cdot \sum A_{sj} \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}} \\ 0,25 \cdot f_{yd} \cdot \sum A_{sj} \end{array} \right. \quad [7.4.20]$$

$$V_{fd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \mu_f \cdot \left[\left(\sum A_{sj} \cdot f_{yd} + N_{Ed} \right) \cdot \xi + M_{Ed}/Z \right] \\ 0,5 \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot \xi \cdot l_w \cdot b_{wo} \end{array} \right. \quad [7.4.22]$$

Verifiche rinforzi in FRP

Le verifiche delle sezioni in c.a. rinforzate con nastri in fibra di carbonio (FRP) sono descritte nel seguito. La procedura di calcolo fa riferimento alla seguenti normative:

- CNR-DT 200 R1/2013 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati - Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie;
- Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP - Documento approvato il 24 luglio 2009 dall'assemblea Generale Consiglio Superiore LL PP

Con riferimento alla CNR-DT200, la resistenza del nastro in FRP allo stato limite ultimo viene assunta il minimo fra:

- Resistenza per distacco di estremità, valutata con l'espressione:

$$f_{\text{fdd}} = \frac{1}{\gamma_{\text{fd}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{\text{Fd}}}{t_f}}, \quad (4.4)$$

un cui l'energia specifica di frattura è valutata come:

$$\Gamma_{\text{Fd}} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{\text{cm}} \cdot f_{\text{ctm}}}. \quad (4.2)$$

- Resistenza per distacco intermedio, valutata come:

$$f_{\text{fdd},2} = \frac{k_q}{\gamma_{\text{fd}}} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \cdot \frac{2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{\text{cm}} \cdot f_{\text{ctm}}}}, \quad (4.6)$$

assumendo inoltre una deformazione ultima pari al minimo fra quella massima dichiarata dal produttore (moltiplicata per η_A / γ_f) e:

$$\varepsilon_{\text{fdd}} = \frac{f_{\text{fdd},2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0, \quad (4.7)$$

In output il programma riporta la tensione massima assorbibile dal nastro, l'energia di frattura e la lunghezza minima di ancoraggio, ottenuta dalla relazione:

$$l_{\text{ed}} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{\text{Rd}} \cdot f_{\text{bd}}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{\text{Fd}}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\}, \quad (4.1)$$

In cui $f_{\text{bd}} = \frac{2 \cdot \Gamma_{\text{Fd}}}{s_u}$, con $s_u = 0.25 \text{ mm}$ e $\gamma_{\text{Rd}} = 1.25$.

Verifiche da analisi non lineare

L'analisi statica non lineare di pushover consta di una verifica globale (eseguita nel piano ADRS dalla maschera *Estrai Dati*) e dalle verifiche locali dei meccanismi duttili (flessione) e fragili (taglio).

Per le strutture in c.a., è necessario dapprima verificare globalmente la struttura (pulsante Metodo N2 da Estrai Dati, alla voce *Taglio di base X/Y VS. spost. X/Y*). Una volta determinato in questo modo il Performance Point della curva, e quindi la domanda in spostamento, verrà automaticamente trovato il punto della curva più vicino. In questo punto saranno svolte le verifiche locali duttili e fragili, direttamente sui dati forniti dalle cerniere.

Estrai dati dai risultati

Selezione caso di carico: **pushoverX modal**

Selezione il tipo di dati:

- Temperatura solidi
- Fattori di partecipazione
- Rapporti massa part.
- Periodi
- Forza VS spost. Molle
- Forza VS spost. Cerniere
- Taglio di base X VS spost. X**
- Taglio di base Y VS spost. Y
- Taglio di base Z VS spost. Z
- Stress nodali
- Forze nodali shell
- Temperature nodali
- Peso armature

Numero:

Tempo/Modo | Spostamento | Valore

2-X	m*	1.228E+002
2-X	Fpart	1.000E+000
2-X	T*	2.446E-001
2-X	Tc*	4.400E-001
2-X	d*	3.243E-003

Tutti Pulisci

Selezione in vista

Trova: Vai

Stazioni/punti

Selezione tempo o modo:

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

Selezione il tipo di risultato:

ADRS

Sa [m/s²]

PP(3.006e-3,1.983e0)

Verifiche

Impostazioni di verifica:

sulle seguenti quantità: Risultati da elementi

per il caso di carico: **pushoverX**

per tempo/modo: **1.0029**

Solo I e J

TUTTI

Set di verifiche: **NTC_CA_hinge**

Verifica sezioni CA NTC2018

Stato Limite SLO 1-SLD 2-SLV 3-SLC 4

SL **3**

Importa formule personalizzate... Pulisci

Risultati testuali su oggetto selezionato

Salva log per ogni stazione

Lancia verifica

Esegui verifiche Stop

Ricarica verifiche salvate Esporta tabella...

Testa verifica su un solo elemento 26s

Cancella verifiche salvate

Clicca su una riga per evidenziare l'oggetto

Istante	TaglioY	TaglioZ	CapFlessionaleY	CapFlessionaleZ
verX-1.0029	0.23504701	0.00382295	0.00000248	0.00001883
verX-1.0029	0.16728065	0.00755782	0.00000154	0.00224214
verX-1.0029	0.45566003	0.00003161	0.00000000	0.00920606
verX-1.0029	0.45564980	0.00003161	0.00000000	0.00766260
verX-1.0029	0.25838763	0.00000242	0.00000000	0.00120730
verX-1.0029	0.26096081	0.00000112	0.00000000	0.00001692
verX-1.0029	0.45566514	0.00003161	0.00000000	0.00768030
verX-1.0029	0.45564469	0.00003161	0.00000000	0.00768062
verX-1.0029	0.23640512	0.00001524	0.00000000	0.00119790
verX-1.0029	0.21377768	0.00000699	0.00000000	0.00001709
verX-1.0029	0.45564469	0.00003161	0.00000000	0.00768021
verX-1.0029	0.45566514	0.00003161	0.00000000	0.00768030
verX-1.0029	0.21461403	0.00000710	0.00000000	0.00001692
verX-1.0029	0.23650131	0.00001533	0.00000000	0.00120723
verX-1.0029	0.45570094	0.00003161	0.00000000	0.00766351

Mostra solo non verificate Evidenzia nel viewport

Unità in: kN, m, °C

Accuratezza risultati: **0.00000000**

Chiudi

Per svolgere le verifiche, dalla maschera *Verifiche* selezionare nell'ordine:

- Il caso di carico di pushover
- Le stazioni "Solo I e J"
- Il set di verifica "NTC_CA_hinge"
- Lo stato limite di riferimento. Di default è SLV
- Opzionalmente, aumentare l'accuratezza risultati, per evidenziare eventuali rapporti D/C molto bassi.

Se la verifica globale è stata eseguita correttamente, il menu "tempo/modo" viene compilato con il punto della curva rappresentante la domanda di spostamento (nell'immagine, t=1.0029).

La verifica per il c.a. restituisce:

- il rapporto fra il taglio sollecitante e quello da Circ. 7/2019, §C8.7.2.8, per entrambe le direzioni locali della trave Y e Z;
- il rapporto fra rotazione della singola cerniera e quella alla corda massima associata al singolo elemento secondo C8.7.2.3 Circ.7/2019.

Le cerniere plastiche sono definite secondo le seguenti quantità.

DoF locale	Azione associata	Resistenza	Duttilità
1	N (trazione)	Nrd corrispondente	6
1	N (compressione)	Nrd da stabilità	1
2	Vy	Vr ciclico corrispondente	1
3	Vz	Vr ciclico corrispondente	1
4	Mt	Trd corrispondente	1
5	Myy	Mrd corrispondente	$\frac{\theta_u}{\theta_y}$
6	Mzz	Mrd corrispondente	$\frac{\theta_u}{\theta_y}$

Per analisi cicliche, le cerniere plastiche seguono un ciclo peak-oriented.

Codici errore

Descrizione del codice errore nella colonna "Non processato":

- 100 elemento non lavorato per mancanza di materiale diverso dal cemento armato o armatura
- 102 materiale per le barre mancante
- 103 materiale della barra errato (deformazioni di progettazione mancanti)
- 104 lo stress supera la tensione massima
- 105 lo stress supera la compressione massima
- 106 (solo in caso di analisi elastica) N=0, analisi non possibile in assenza di tensioni
- 107 (solo nel caso di analisi elastica) l'analisi elastica non converge
- 108 materiale non impostato per una figura solida o vuota in sezione
- 109 (solo per materiale legnoso) tensione caratteristica a flessione fmk mancante
- 110 (solo per tratti confinati) parentesi non impostate
- 111 (solo per sezioni composte acciaio-clc) materiale base errato per sezione composita
- 112 (solo analisi termica del legno) forma della sezione trasversale errata - solo sezioni trasversali rettangolari e
- 113 (solo per sezioni composte acciaio-clc) materiale mancante per la parte della sezione
- 115 resistenza fk del materiale non impostata
- 116 (solo per calcolo con calcestruzzo anche a trazione) resistenza del materiale ftk non impostata
- 117 deformazione e_c2 mancante
- 118 Manca la deformazione e_c3
- 119 deformazione e_cu mancante
- 120 (solo per sezioni in FRP) impossibile continuare il calcolo, EpsU<EpsSy-Eps0 (4.7 CNR DT 200)
- 121 meshing non riuscito (non utilizzare strisce di FRP nelle sezioni meshate)

Capitolo 6

Verifiche per strutture in legno

In questo capitolo sono descritte le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le membrature in legno.

Simboli utilizzati

A: Area
Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**
Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**
Jt: inerzia torsionale
D: diametro esterno sezione
b: base della sezione per tutte le sezioni generiche
h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche
tw: **spessore dell'anima**
tf1: spessore della flangia superiore
tf2: spessore della flangia inferiore
t: spessore delle sezioni per elementi piani
N: forza assiale
V: Taglio generico lungo un asse della sezione
Vy: Taglio lungo Y
Vz: Taglio lungo Z
Mt: Momento torcente
M: Momento generico attorno ad un asse della sezione
Myy: **Momento attorno all'asse Y**
Mzz: **Momento attorno all'asse Z**
Em: modulo di Young del materiale
Gm: modulo di taglio del materiale
Nlm: coefficiente di Poisson del materiale
fk: resistenza caratteristica del materiale
WelZ: modulo resistente in direzione Z
WelY: modulo resistente in direzione Y
WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z
WplY: modulo resistente plastico in direzione Y
iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**
iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**
imin: **raggio d'inerzia minimo**
fc0k: resistenza assiale a compressione parallela alle fibre
fc90k: resistenza assiale a compressione ortogonale alle fibre
ft0k: resistenza assiale a trazione parallela alle fibre
fmk: resistenza a flessione
E0mean: modulo elastico medio parallelo alle fibre
E005: frattile al 5% del modulo elastico parallelo alle fibre
E90mean: modulo elastico medio ortogonale alle fibre
Gmean: modulo di taglio medio

Elenco verifiche

Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ AVVISIO: le seguenti verifiche coprono solo i telai (travi).

⚠ AVVISIO: le seguenti verifiche coprono solo le sezioni di travi rettangolari e circolari. Gli altri tipi di sezione non sono considerate.

Stati limite ultimi

Trazione

$$\rho_N = \frac{\frac{N}{A}}{f_{t0d}}$$

Compressione

$$\rho_N = \frac{\frac{-N}{A}}{f_{c0d}}$$

Flessione

$$\rho_M = \max \left(\frac{\frac{\frac{|M_y|}{W_{el,y}} + k_m \frac{|M_z|}{W_{el,z}}}{f_{md}}, \frac{k_m \frac{|M_y|}{W_{el,y}} + \frac{|M_z|}{W_{el,z}}}{f_{md}}} \right)$$

con k_m pari a 0.7 se la sezione è rettangolare, 1 altrimenti.

Taglio

Per sezioni rettangolari – direzione più sfavorevole

$$\rho_V = \frac{1.5 \max(|V_y|, |V_z|)}{k_{cr} \cdot A \cdot f_{vd}}$$

con k_{cr} coefficiente di riduzione della larghezza di sezione trasversale (default 0.67)

Per sezioni circolari – risultante dei tagli

$$\rho_V = \frac{4\sqrt{V_y^2 + V_z^2}}{3k_{cr} \cdot A \cdot f_{vd}}$$

Torsione

Per sezioni rettangolari:

$$\rho_T = \frac{|M_t|}{k_{sh} \cdot W_t \cdot f_{vd}}$$

$$\text{con } W_t = \frac{\max(b, h) \cdot \min(b, h)^2}{3 + 1.8 \frac{\min(b, h)}{\max(b, h)}} \quad k_{sh} = \min \left(1 + 0.15 \frac{\max(b, h)}{\min(b, h)}, 2 \right)$$

Per sezioni circolari

$$\rho_T = \frac{|M_t|}{1.2 \cdot W_t \cdot f_{vd}}$$

$$\text{con } W_t = \frac{2J_t}{D}$$

Tensoflessione

$$\rho_{Tbend} = \max \left(\frac{N}{f_{t0d}} + \frac{|M_y|}{f_{md}} + k_m \frac{|M_z|}{f_{md}}, \frac{N}{f_{t0d}} + k_m \frac{|M_y|}{f_{md}} + \frac{|M_z|}{f_{md}} \right)$$

Pressoflessione

$$\rho_{Cbend} = \max \left(\left(\frac{-N}{f_{c0d}} \right)^2 + \frac{|M_y|}{f_{md}} + k_m \frac{|M_z|}{f_{md}}, \left(\frac{-N}{f_{c0d}} \right)^2 + k_m \frac{|M_y|}{f_{md}} + \frac{|M_z|}{f_{md}} \right)$$

Stabilità

Per le colonne:

$$\lambda_{rel} = \frac{\frac{L_0}{i}}{\pi \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{005}}}} \quad k_{crit} = \begin{cases} 1 & \lambda_{rel} \leq 0.3 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 + \lambda_{rel}^2}} & \lambda_{rel} > 0.3 \end{cases}$$

$$k = 0.5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$$

$$\text{Se } \lambda_{rel} \leq 0.3: \rho_{stabC} = \max \left(\left(\frac{-N}{k_{crit} \cdot f_{c0d}} \right)^2 + \frac{|M_y|}{W_{el,y}} + k_m \frac{|M_z|}{W_{el,z}}, \left(\frac{-N}{k_{crit} \cdot f_{c0d}} \right)^2 + k_m \frac{|M_y|}{W_{el,y}} + \frac{|M_z|}{W_{el,z}} \right)$$

Per le travi:

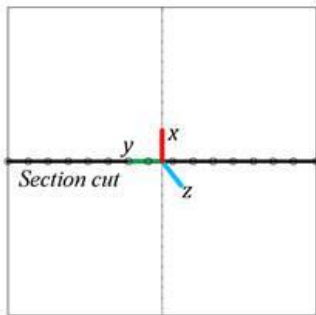
$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{m,crit}}} \quad \sigma_{m,crit} = \pi \sqrt{\frac{E_{0.05} J_y G_{0.05} J_t}{k_{eff} L \cdot W_{elZ}}}$$

$$\text{Dati } k_{crit} = \begin{cases} 1 & \lambda_{rel} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \lambda_{rel} & 0.75 < \lambda_{rel} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel}^2} & \lambda_{rel} > 1.4 \end{cases}$$

$$\rho_{stab} = \frac{-N}{k_c \cdot f_{c0d}} + \left(\frac{\frac{|M_z|}{W_{el,z}}}{f_{md} k_{crit}} \right)^2$$

Stati limite ultimi per pannelli in XLam

Le verifiche sono basate sulle seguenti quantità:



$$\begin{aligned} \sigma_{N0} &= \frac{N}{t \cdot h} & \sigma_{M0} &= \frac{6|M_{zz}|}{t \cdot h^2} \\ \sigma_{Nc} &= |\min(\sigma_{N0} - \sigma_{M0}, 0)| & \sigma_{Nt} &= \max(\sigma_{N0} - \sigma_{M0}, 0) \\ \sigma_M &= \frac{6|M_{yy}|}{t \cdot h^2} & \tau_T &= \frac{|M_t|}{J_t} t & \tau_{Vz} &= 1.5 \frac{|V_z|}{A \cdot k_{cr}} & \tau_{Vy} &= 1.5 \frac{|V_y|}{A \cdot k_{cr}} \end{aligned}$$

Gli assi locali sono conformi alla convenzione per le section cut.

La resistenza a taglio di incollaggio è scelta dall'utente f_{gk} - il valore raccomandato è 2.5MPa. La resistenza a taglio per rotolamento dei pannelli è assunta pari a:

$$f_{RVdCLT} = \min(1MPa, 2f_{t90k}) \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$$

Assiale (con controllo aggiuntivo da Teilprojekt-15 (5-45))

$$\rho_N = \max \left(\frac{\sigma_{Nt}}{f_{t0d}} + \frac{\sigma_M}{f_{md}}, \frac{\sigma_{Nc}}{f_{c0d}} + \frac{\sigma_M}{f_{md}}, \frac{\max(\sigma_{Nc}, \sigma_{Nt}) + \sigma_M}{f_{md}} \right)$$

Compressione ortogonale alle fibre

$$\rho = \frac{\sigma_{Nc} + \sigma_M}{f_{c90d}}$$

Taglio-torsione

$$\rho = \left(\frac{\tau_{Vy}}{f_{vd}} \right)^2 + \frac{\tau_T}{k_{sh} \cdot f_{vd}}$$

Taglio fuori piano

$$\rho = \frac{\tau_{Vy}}{f_{vd}}$$

Resistenza incollaggio per torsione

$$\rho = \frac{\tau_T}{\frac{k_{mod} \cdot f_{gk}}{\gamma_m}}$$

Taglio per rotolamento delle fibre

$$\rho = \max \left(\frac{\sigma_{Nt}}{f_{t0d}}, \frac{\sigma_{Nc}}{f_{c0d}} \right) + \frac{\tau_T}{f_{RVdCLT}}$$

Stabilità

La verifica di stabilità è condotta come per le colonne in legno.

Stati limite di esercizio

Le verifiche di resistenza per gli stati limite di esercizio sono le stesse elencate per gli stati limite ultimi.

Le verifiche di deformabilità per gli stati limite di esercizio sono differenziate sulla scorta del tipo di combinazione di servizio.

Per le combinazioni rare (o caratteristiche), la freccia finale totale viene calcolata includendo gli effetti viscosi, come da relazione seguente:

$$f_{fin} = f_P (1 + k_{def}) + f_{Q1} (1 + \psi_2 k_{def}) + \sum_i f_{Qi} (\psi_0 + \psi_2 k_{def})$$

In cui f_P è la freccia dei carichi permanenti, f_{Q1} è la freccia dei carichi variabili principali, f_{Qi} è la freccia dell'i-esimo caso di carico variabile secondario nella combinazione di servizio considerata.

Per le altre combinazioni, la verifica di deformabilità viene svolta contro il limite specificato e riportata solo per completezza nella colonna *_Freccia*, che non fa parte degli involuppi dei rapporti di verifica.

Verifica di deformabilità delle membrature (Freccia)

$$\rho_f = \frac{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}}{defLimit}$$

⚠ ATTENZIONE: *defLimit* viene settato prima dell'inizio delle verifiche, separatamente per travi e colonne. Di default i valori sono di 1/250 per le travi (*defTR*) e di 1/300 per le colonne (*defCOL*).

Capitolo 7

Verifiche per profili sottili in acciaio

In questo capitolo sono descritte le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per i profili sottili in acciaio (piegati a freddo) secondo l'Eurocodice 3, parti 1-3 e 1-5.

Simboli utilizzati

A: Area

Jz: inerzia rispetto all'asse Z della sezione

Jy: inerzia rispetto all'asse Y della sezione

Jt: inerzia torsionale

D: diametro esterno sezione

b: base della sezione per tutte le sezioni generiche

h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche

tw: **spessore dell'anima**

tf1: spessore della flangia superiore

tf2: spessore della flangia inferiore

t: spessore delle sezioni per elementi piani

N: forza assiale

V: Taglio generico lungo un asse della sezione

Vy: Taglio lungo Y

Vz: Taglio lungo Z

Mt: Momento torcente

M: Momento generico attorno ad un asse della sezione

Myy: **Momento attorno all'asse Y**

Mzz: **Momento attorno all'asse Z**

Em: modulo di Young del materiale

Gm: modulo di taglio del materiale

Nm: coefficiente di Poisson del materiale

fk: resistenza caratteristica del materiale

WelZ: modulo resistente in direzione Z

WelY: modulo resistente in direzione Y

WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z

WplY: modulo resistente plastico in direzione Y

iz: raggio d'inerzia per l'asse Z

iy: raggio d'inerzia per l'asse Y

imin: raggio d'inerzia minimo

Elenco verifiche

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave in materiale acciaio. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

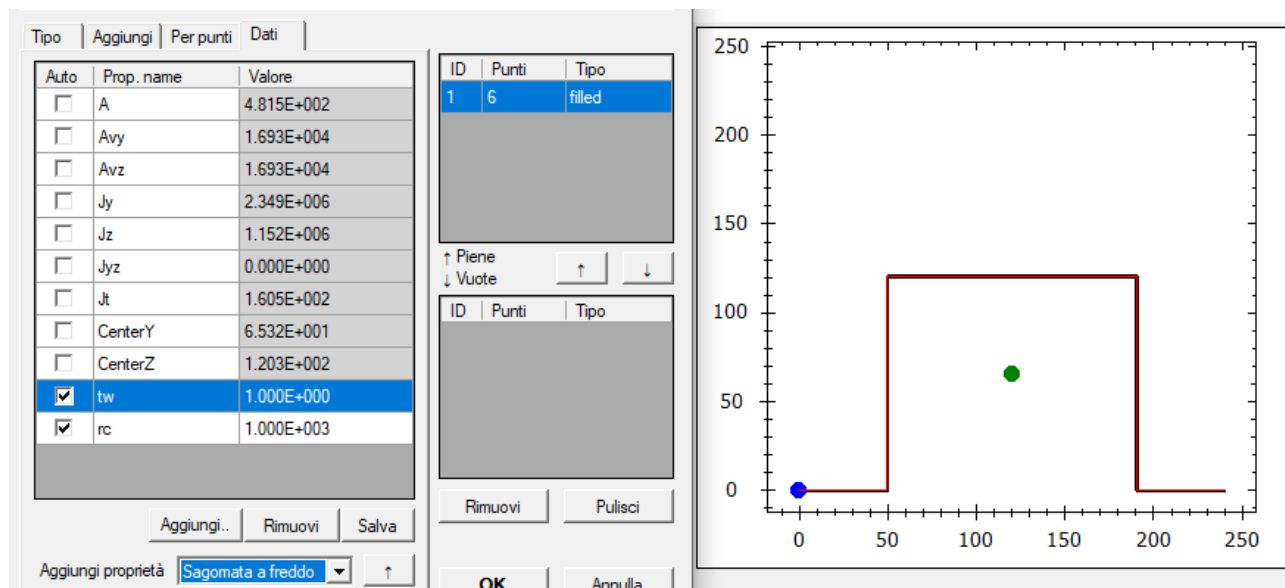
R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ ATTENZIONE: le verifiche riportate si riferiscono esclusivamente a sezioni di classe 3 o 4. Le capacità plastiche, tipiche delle sezioni di classe 1 e 2, non sono calcolate per questo tipo di profili.

Ipotesi di calcolo

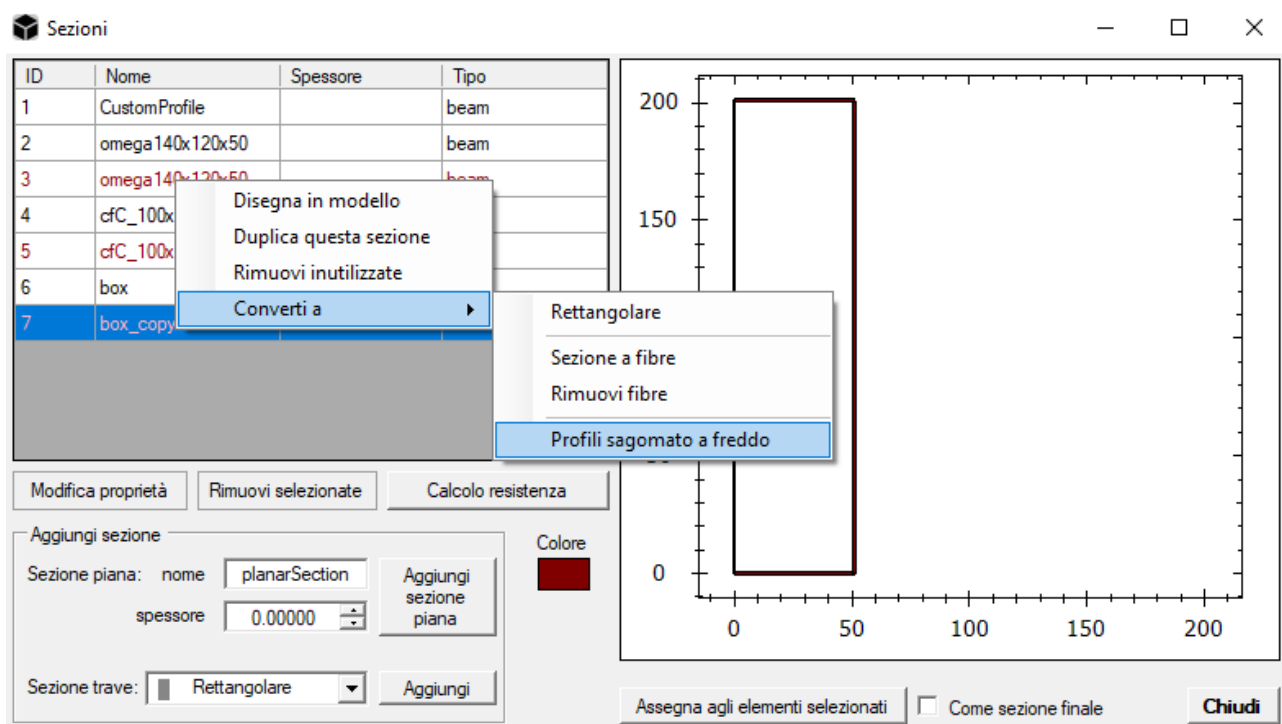
Le sezioni sottili sono imputate attraverso la sequenza di punti rappresentante la spezzata che definisce la linea media del profilo. Questo tipo di sezione può essere definita aggiungendo il set di proprietà "Sagomata a freddo" nella tab "Dati" delle proprietà della sezione. I dati richiesti sono spessore t_w e raggio di curvatura r_c .



In alternativa, è possibile convertire una sezione già definita nella maschera *Sezioni* con il comando click destro/Converti a/Profilo sagomato a freddo.

Le sezioni supportate per la conversione sono:

- C
- L
- Doppio C
- Doppio L
- Omega
- Omega con parametro d negativo, ovvero C con ali rinforzate
- Scatolari (box).



Valutazione della classe della sezione

Conservativamente, la classe di ogni sezione è valutata come la massima classe fra tutte le parti della sezione considerate puramente compresse. Ogni singolo lato della sezione è valutato separatamente, distinguendo fra parti interne e parti esterne del profilo. La classe del profilo è la massima rilevata in tutti i lati.

Parte	Rapporto	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
esterna	b_{eff}/t_w	9ε	10ε	14ε	/
interna	b_{eff}/t_w	33ε	38ε	42ε	/

$$\text{con } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Le larghezze efficaci b_{eff} di ogni segmento del profilo sono determinate assumendo la parte in compressione, mentre i coefficienti di imbozzamento sono assunti pari a 0.43 per le parti esterne, 4 per quelle interne. La resistenza del materiale assunta nel calcolo è quella base (f_y nell'EC3-1-3).

I coefficienti parziali di sicurezza sono assunti, salvo ulteriore specifica, pari a:

$$\gamma_{M0} = 1$$

$$\gamma_{M1} = 1$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

Il nome della colonna nel programma viene presentato fra parentesi (es. *Assiale*).

Trazione/compressione (*Assiale*)

In trazione:

$$\rho_N = \frac{N}{N_{Rd}} = \frac{N}{\frac{Af_{yk}}{\gamma_{M0}}}$$

In compressione (stabilità euleriana):

$$\rho_{Nb} = \frac{N}{N_{b,Rd}} = \frac{N}{\frac{\chi_{\min} A f_{yk}}{\gamma_{M1}}}$$

con χ_{\min} ottenuto da paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC2018. Le curve di instabilità sono scelte concordemente alla seguente tabella:

Tipo sezione	α_y	α_z	α_{LT}
tutte	0.49	0.49	0.76

Taglio semplice (Taglio)

$$\text{Per l'anima: } \rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{0.346 \frac{h_w}{t_w} \sqrt{f_y E_m}}$$

$$\text{Per le flange: } \rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{\frac{b_w \cdot t_w}{\gamma_{m0}} f_{bv}} \text{ con } f_{bv} \text{ resistenza a taglio ridotta.}$$

Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{\alpha_{PL} \cdot W \cdot f_{yk} \cdot \cos(\rho_N)} = \frac{M}{M_{Rd} \cdot \cos(\rho_N)} \text{ se il taglio sollecitante non supera il 30\% di quello resistente plastico}$$

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{M_{Rd,red}}, \text{ con } M_{Rd,red} = M_{Rd} \left(1 - \min((2\rho_V - 1)^2, 1)\right) \text{ se il taglio sollecitante supera il 50\% di quello resistente, } M_{Rd,red} = M_{Rd} \text{ altrimenti.}$$

Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biass)

Se l'elemento è compresso, le verifiche a instabilità sono eseguite secondo la procedura semplificata A delle NTC2018.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \text{ con } r_{ridN_{cr}} = 1 - \frac{\rho_N \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M0}}$$

Se l'elemento è teso:

$$\rho_{MNb} = \rho_N + \rho_{M_y} + \rho_{M_z}$$

Flesso-torsione (Flesso_torsione)

$$\rho_{MTb} = \frac{M}{M_{b,Rd}} = \frac{M}{\frac{\chi_{LT} A \cdot W_{pl} \cdot f_k}{\gamma_{M1}}}$$

Per la flessione-torsione, il momento torcente di secondo ordine è funzione della costante di ingobbamento:

$$M_{cr} = \psi \frac{\pi}{L_{0b}} \sqrt{EI_y \cdot GI_T} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{0b}} \right)^2 \cdot \frac{EI_\omega}{GI_T}}$$

Nel calcolo del momento critico, il coefficiente ψ viene forzato al valore di 1.127 se la trave presenta momenti nulli alle estremità. In ogni caso non può superare il valore di 1.285.

Flessione-torsione combinata (Flessotors_comb)

La verifica viene svolta secondo NTC2018, C4.2.4.1.3.3.1 Metodo A.

$$\rho_{MNB} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \text{ e } \rho_{MNB} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} \text{ (per sezioni ruotate)}$$

Verifiche di deformabilità

Verifica di deformabilità delle membrature (Inflessione)

$$\rho_f = \frac{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}}{defLimit}$$

⚠ ATTENZIONE: *defLimit* viene settato prima dell'inizio delle verifiche, separatamente per travi e colonne. Di default i valori sono di 1/250 per le travi (*defTR*) e di 1/300 per le colonne (*defCOL*)

Profili in acciaio sagomati a freddo secondo Eurocodice 3-1-3	
Deformabilità massima travi	
defTR	0.004
Deformabilità massima colonne	
defCOL	0.00333

Capitolo 8

Verifiche per profili sottili in alluminio

In questo capitolo sono descritte le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per i profili sottili in acciaio (piegati a freddo) secondo la norma Eurocodice 9 parte 1-4.

Simboli utilizzati

A: Area
Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**
Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**
Jt: inerzia torsionale
D: diametro esterno sezione
b: base della sezione per tutte le sezioni generiche
h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche
tw: **spessore dell'anima**
tf1: spessore della flangia superiore
tf2: spessore della flangia inferiore
t: spessore delle sezioni per elementi piani
N: forza assiale
V: Taglio generico lungo un asse della sezione
Vy: Taglio lungo Y
Vz: Taglio lungo Z
Mt: Momento torcente
M: Momento generico attorno ad un asse della sezione
My: **Momento attorno all'asse Y**
Mz: **Momento attorno all'asse Z**
Em: modulo di Young del materiale
Gm: modulo di taglio del materiale
Nlm: coefficiente di Poisson del materiale
fk: resistenza caratteristica del materiale
WelZ: modulo resistente in direzione Z
WelY: modulo resistente in direzione Y
WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z
WplY: modulo resistente plastico in direzione Y
iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**
iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**
imin: **raggio d'inerzia minimo**

Elenco verifiche

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

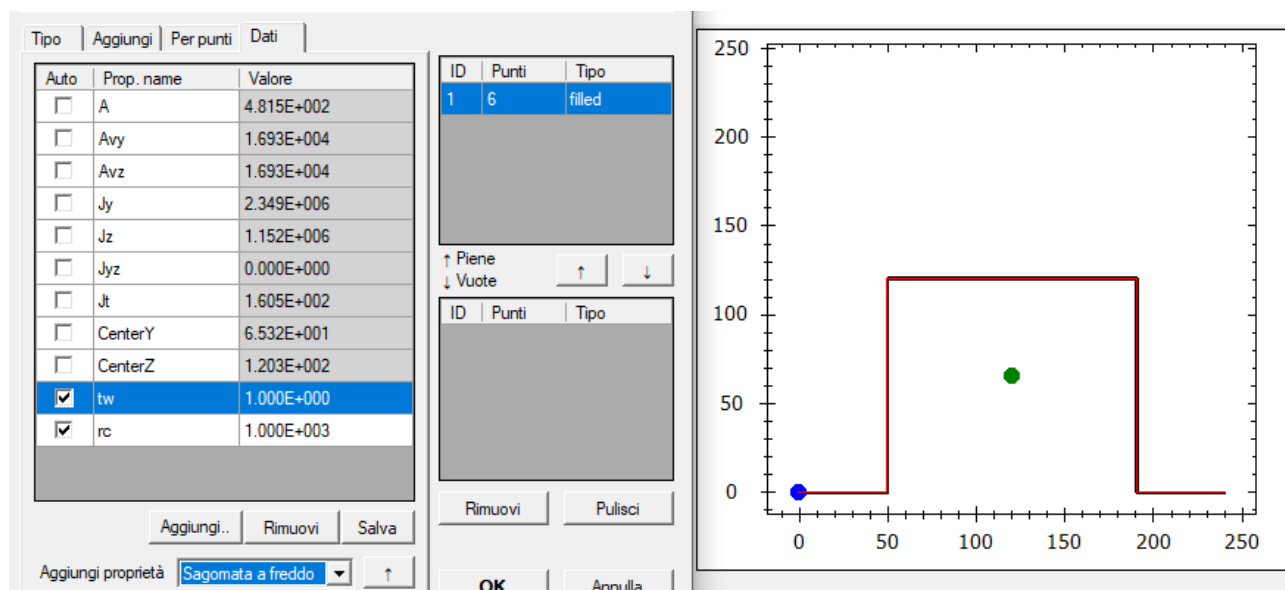
R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ ATTENZIONE: le verifiche riportate si riferiscono esclusivamente a sezioni di classe 3 o 4. Le capacità plastiche, tipiche delle sezioni di classe 1 e 2, non sono calcolate per questo tipo di profili.

Ipotesi di calcolo

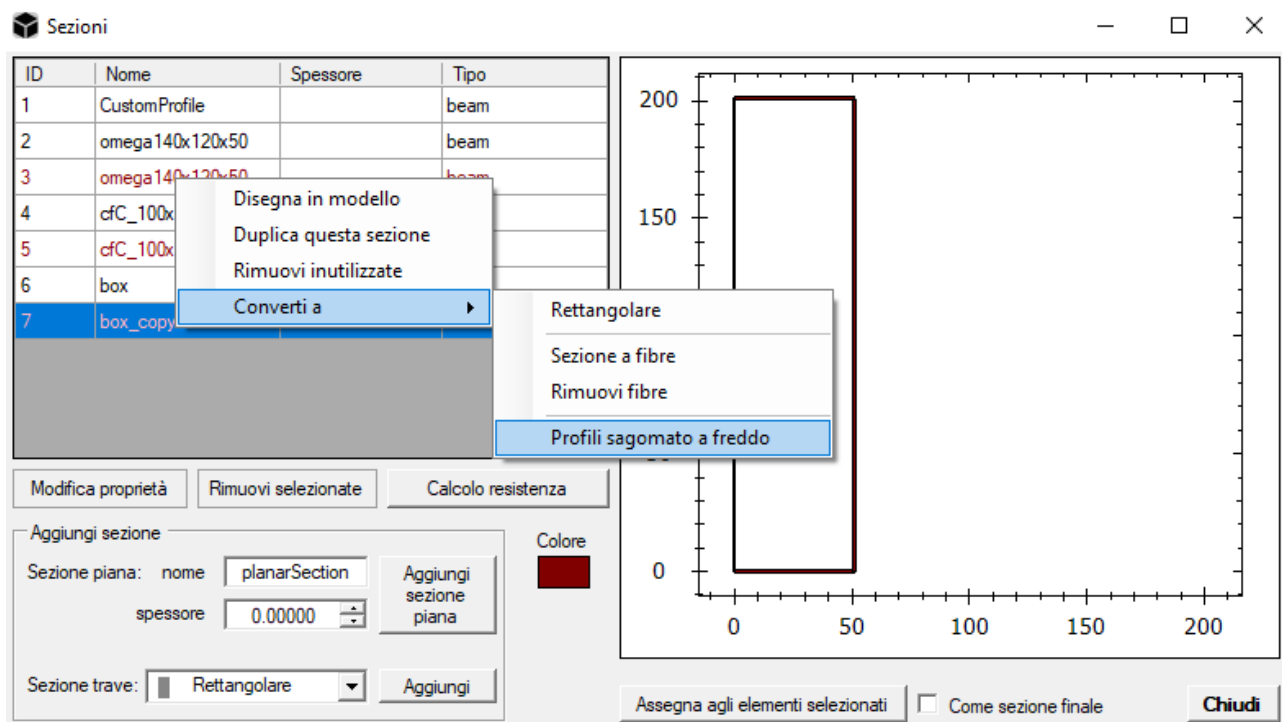
Le sezioni sottili sono imputate attraverso la sequenza di punti rappresentante la spezzata che definisce la linea **media del profilo**. Questo tipo di sezione può essere definita aggiungendo il set di proprietà **"Sagomata a freddo"** nella scheda **"Dati"** delle proprietà della sezione. I dati richiesti sono spessore t_w e raggio di curvatura r_c .



In alternativa, è possibile convertire una sezione già definita nella maschera *Sezioni* con il comando click destro/Converti a/Profilo sagomato a freddo.

Le sezioni supportate per la conversione sono:

- C
- L
- Doppio C
- Doppio L
- Omega
- Omega con parametro d negativo, ovvero C con ali rinforzate
- Scatolari (box).



Valutazione della classe della sezione

Conservativamente, la classe di ogni sezione è valutata come la massima classe fra tutte le parti della sezione considerate puramente compresse. Ogni singolo lato della sezione è valutato separatamente, distinguendo fra parti interne e parti esterne del profilo. La classe del profilo è la massima rilevata in tutti i lati.

Parte	Rapporto	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
esterna	b_{eff}/t_w	β_1	β_2	β_3	/
interna	b_{eff}/t_w	β_1	β_2	β_3	/

I valori β_1 , β_2 , β_3 vengono calcolati considerando i rapporti β/ϵ , riportati nella tabella sottostante, moltiplicati per il parametro ϵ definito come segue:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$$

Le larghezze efficaci b_{eff} di ogni segmento del profilo sono determinate assumendo la parte in compressione, mentre i coefficienti di imbozzamento sono assunti pari 4.

La resistenza del materiale assunta nel calcolo è quella base (f_0 oppure f_{0HAZ} nell'EC9-1-4, indicato come f_{yk} nel seguito).

I coefficienti parziali di sicurezza sono assunti, salvo ulteriore specifica, pari a:

$$\gamma_{M0} = 1.1$$

$$\gamma_{M1} = 1.1$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

Il nome della colonna in tabella verifiche viene presentato fra parentesi (es. *Assiale*).

Trazione/compressione (Assiale)

In trazione:

$$\rho_N = \frac{N}{N_{Rd}} = \frac{N}{\frac{Af_{yk}}{\gamma_{M0}}}$$

In compressione (stabilità euleriana):

$$\rho_{Nb} = \frac{N}{N_{b,Rd}} = \frac{N}{\frac{\chi_{\min} Af_{yk}}{\gamma_{M1}}}$$

con χ_{\min} ottenuto da paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC2018. Le curve di instabilità sono scelte concordemente alla seguente tabella:

Tipo sezione	α_y	α_z	α_{LT}
tutte	0.49	0.49	0.76

Taglio semplice (Taglio)

$$\text{Per l'anima: } \rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{0.346 \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_y}{E_m}}}$$

$$\text{Per le flange: } \rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{\frac{b_w \cdot t_w}{\gamma_{m0}} f_{bv}} \text{ con } f_{bv} \text{ resistenza a taglio ridotta.}$$

Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{\alpha_{PL} \cdot W \cdot f_{yk} \cdot \cos(\rho_N)} = \frac{M}{M_{Rd} \cdot \cos(\rho_N)} \text{ se il taglio sollecitante non supera il 30\% di quello resistente plastico}$$

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{M_{Rd,red}}, \text{ con } M_{Rd,red} = M_{Rd} \left(1 - \min((2\rho_V - 1)^2, 1)\right) \text{ se il taglio sollecitante supera il 50\% di quello resistente, } M_{Rd,red} = M_{Rd} \text{ altrimenti.}$$

Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biass)

Se l'elemento è compresso, le verifiche a instabilità sono eseguite secondo la procedura semplificata A delle NTC2018.

$$\rho_{MNB} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \text{ con } r_{ridN_{cr}} = 1 - \frac{\rho_N \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M0}}$$

Se l'elemento è teso:

$$\rho_{MNB} = \rho_N + \rho_{M_y} + \rho_{M_z}$$

Flesso-torsione (Flesso_torsione)

$$\rho_{MTb} = \frac{M}{M_{b,Rd}} = \frac{M}{\frac{\chi_{LT} A \cdot W_{pl} \cdot f_k}{\gamma_{M1}}}$$

Per la flessione-torsione, il momento torcente di secondo ordine è funzione della costante di ingobbamento:

$$M_{cr} = \psi \frac{\pi}{L_{0b}} \sqrt{EI_y \cdot GI_T} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{0b}} \right)^2 \cdot \frac{EI_\omega}{GI_T}}$$

Nel calcolo del momento critico, il coefficiente ψ viene forzato al valore di 1.127 se la trave presenta momenti nulli alle estremità. In ogni caso non può superare il valore di 1.285.

Flessione-torsione combinata (Flessotors_comb)

La verifica viene svolta secondo NTC2018, C4.2.4.1.3.3.1 Metodo A.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \text{ e } \rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{\chi_{LT} \cdot r_{ridN_{cr}}} \text{ (per sezioni ruotate)}$$

Verifiche di deformabilità

Verifica di deformabilità delle membrature (Inflessione)

$$\rho_f = \frac{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}}{defLimit}$$

⚠ ATTENZIONE: *defLimit* viene settato prima dell'inizio delle verifiche, separatamente per travi e colonne. Di default i valori sono di 1/250 per le travi (*defTR*) e di 1/300 per le colonne (*defCOL*)

Profili in alluminio sagomati a freddo secondo Eurocodice 9-1-4	
Deformabilità massima travi	
defTR	0.004
Deformabilità massima colonne	
defCOL	0.00333

Capitolo 9

Verifiche per strutture in muratura

In questo capitolo sono descritte le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le strutture in muratura secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17 gennaio 2018 (NTC2018 nel seguito) e Circ. MIT 21 gennaio 2019 n. 7.

Simboli utilizzati

A: Area

Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**

Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**

Jt: inerzia torsionale

D: diametro esterno sezione

b: base della sezione per tutte le sezioni generiche

h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche

tw: **spessore dell'anima**

tf1: spessore della flangia superiore

tf2: spessore della flangia inferiore

t: spessore delle sezioni per elementi piani

N: forza assiale

V: Taglio generico lungo un asse della sezione

Vy: Taglio lungo Y

Vz: Taglio lungo Z

Mt: Momento torcente

M: Momento generico attorno ad un asse della sezione

Myy: **Momento attorno all'asse Y**

Mzz: **Momento attorno all'asse Z**

Em: modulo di Young del materiale

Gm: modulo di taglio del materiale

Nlm: coefficiente di Poisson del materiale

fk: resistenza caratteristica del materiale

WelZ: modulo resistente in direzione Z

WelY: modulo resistente in direzione Y

WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z

WplY: modulo resistente plastico in direzione Y

iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**

iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**

imin: **raggio d'inerzia minimo**

t: spessore del pannello murario

bm: lunghezza del pannello murario

Elenco verifiche

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

Limite a trazione (RottTrazione)

$$\rho_N = \frac{|N|}{t \cdot b_m \cdot f_{td}}$$

Stabilità per carichi verticali (Assiale)

$$\rho_N = \frac{N}{\phi \cdot \phi_L \cdot t \cdot b_m \cdot f_d}$$

con ϕ coefficiente di riduzione ricavato da NTC2018 tab. 4.5.III, ϕ_L coefficiente di riduzione per direzione longitudinale, t spessore, b_m base, f_d resistenza a compressione di progetto.

Il coefficiente di riduzione è funzione della snellezza $\lambda = \frac{L}{t}$ con L altezza del pannello, e delle eccentricità:

$$m1 = \frac{6 \cdot e1}{t} \quad \text{per le stazioni di estremità (1 e 5), con } e1 = \min\left(\frac{L}{200}, 0.33t\right)$$

$$m2 = \frac{6 \cdot e2}{t} \quad \text{per le stazioni interne (es. mezzeria 3), con } e2 = \min\left(\frac{L}{400} + \left|\frac{M_{yy}}{N}\right|, 0.33t\right) \text{ e } M_{yy} \text{ momento fuori piano.}$$

Pressoflessione nel piano (PressoflNelPiano)

$$\rho_{PF} = \frac{M_{zz}}{\frac{t \cdot b_m^2}{2} \cdot \frac{N}{A} \left(1 - \frac{N}{k \cdot b_m \cdot t \cdot f_d}\right)}$$

con k coefficiente di distribuzione delle pressioni (default 0.85).

Per le fasce murarie viene utilizzata la seguente relazione:

$$\rho_{PF} = \frac{M_{zz}}{\frac{t \cdot b_m^2}{2} \cdot \frac{N}{A} \left(1 - \frac{H_p}{k \cdot b_m \cdot t \cdot f_d}\right)}$$

con $H_p = \min(P_{\min}, 0.4 f_{hd} \cdot b_m \cdot t)$, $f_{hd} = \frac{f_d}{4}$ e P_{\min} è la forza resistente fornita da cordoli, travi o tiranti, settata manualmente dall'utente.

⚠ Di default, P_{min} è 0, e la presente verifica viene svolta solo viene specificato un P_{min} non nullo.

Taglio nel piano (Taglio)

Se la variabile TC è impostata su 0 (default), viene calcolato il taglio per scorrimento del pannello (adatto per murature regolari).

$$\rho_v = \frac{V_y}{f_{vd} \cdot b_1 \cdot t}$$

con $f_{vd} = f_{vd0} + 0.4 \frac{N}{b_1 \cdot t}$ e lunghezza compressa $b_1 = \beta \cdot b_m$, compresa fra 0 e b_m :

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{6 \cdot e_b}{b_m} \leq 1 \\ \frac{3}{2} - \frac{3 \cdot e_b}{b_m} & \text{se } \frac{3 \cdot e_b}{b_m} \leq \frac{3}{2} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Se la variabile TC è impostata su 1, viene calcolato il taglio per fessurazione diagonale del pannello (adatto per murature irregolari).

$$\rho_v = \frac{V_y}{\frac{A \cdot f_{td}}{\xi} \sqrt{1 + \frac{N}{A \cdot f_{td}}}}$$

$$\xi = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{L}{b_m} \leq 1 \\ \frac{L}{b_m} & \text{se } \frac{L}{b_m} < 1.5 \\ 1.5 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

⚠ ATTENZIONE: se f_{td} non è definito, viene assunto pari a $1.5 \tau_{0d}$.

Per le fasce murarie, il rapporto con il taglio resistente è pari a:

$$\rho_v = \frac{V_y}{b_m \cdot t \cdot f_{vd0}}$$

Pressoflessione fuori piano (PressoflFuoriPiano)

$$\rho_{PF} = \frac{M_{yy}}{\frac{b_m \cdot t^2}{2} \cdot \frac{N}{A} \left(1 - \frac{N}{k \cdot b_m \cdot t \cdot f_d} \right)}$$

Muratura armata

Flessione

Le verifiche a flessione sono eseguite calcolando la sezione sia per la resistenza nel piano che fuori piano.

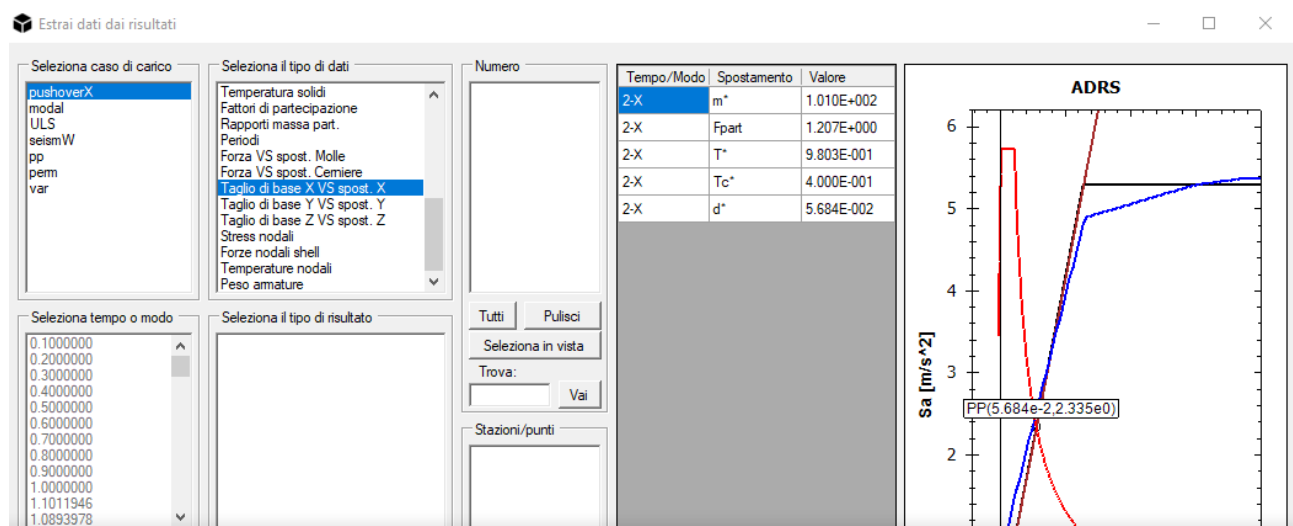
Taglio

$$\rho_{vy} = \frac{|V_y|}{\min\left(0.3f_d \cdot t \cdot d_z, d_z \cdot t \cdot f_{vd} + \frac{0.6A_{swY} \cdot f_{yds} \cdot d_z}{s}\right)}$$

Verifiche da analisi non lineare

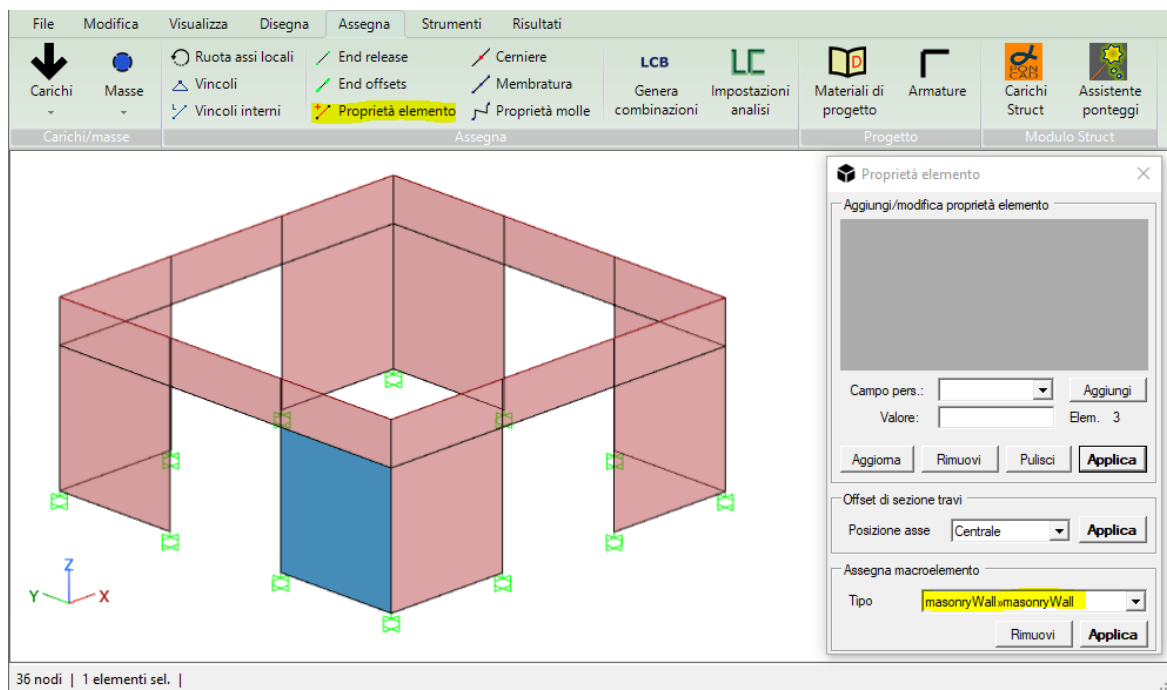
L'analisi statica non lineare di pushover consta di una verifica globale (eseguita nel piano ADRS dalla maschera *Estrai Dati*).

Per le strutture in muratura, è possibile verificare globalmente la struttura (pulsante *Metodo N2* da *Estrai Dati*, alla voce *Taglio di base X/Y VS. spost. X/Y*). Una volta determinato in questo modo il Performance Point della curva, e quindi la domanda in spostamento, verrà automaticamente trovato il punto della curva più vicino.



La capacità non lineare di strutture in muratura può essere modellata in *NextFEM Designer* attraverso 2 approcci:

- Mediante l'assegnazione di cerniere plastiche ad entrambe le estremità di maschi murari e fasce;
- Mediante il macroelemento *masonryWall*, disponibile solo per modellazioni bidimensionali dei pannelli.



Le cerniere plastiche sono definite secondo le seguenti quantità.

DoF locale	Azione associata	Resistenza	Duttilità
1	N (trazione)	$f_{td} * A$	1
1	N (compressione)	Nrd da stabilità	1.5
2	Vy	Vrd da taglio nel piano	2.5
3	Vz	$b m * t * f_{vd0}$	2.5
4	Mt	$f_{vd0} * W_t$	1
5	Myy	Mrd da pressofl.	5
6	Mzz	Mrd da pressofl.	5

Per analisi cicliche, le cerniere plastiche seguono un ciclo peak-oriented e mantengono la capacità alla fessurazione (in altri termini, il taglio resistente non è aggiornato al variare dello sforzo assiale una volta raggiunto il limite elastico).

I macroelementi *masonryWall* determinano la resistenza nel seguente modo:

- per i maschi murari, come minimo della resistenza a pressoflessione, taglio per scorrimento e taglio per fessurazione diagonale, valutate con lo sforzo assiale al passo di integrazione. Per escludere un meccanismo, annullare la corrispondente resistenza nelle caratteristiche del materiale (rispettivamente, f_k , f_{v0} e t_0 , f_{tu});
- per le fasce, il massimo fra la resistenza a taglio puro ($b m * t * f_{v0}$) e quella a fessurazione diagonale valutata con lo sforzo assiale al passo di integrazione.

Restituiscono una risposta non lineare sia nel piano che fuori piano:

- Spostamento ultimo a taglio di default: $0.005 L$, modificabile aggiungendo al materiale il valore "Du";

- Rotazione ultima per pressoflessione di default: 0.01, modificabile aggiungendo al materiale il **valore "Ru"**.

L'uso di questo elemento è consigliato per analisi di pushover, cicliche e dinamiche.