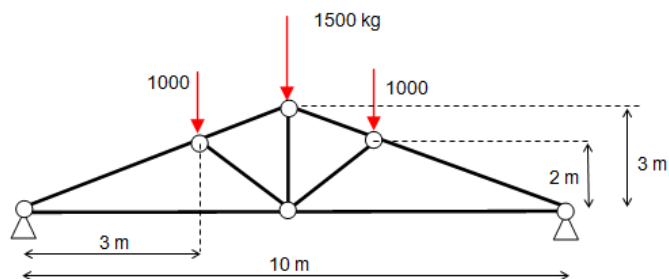


Telai.Az

Software per il calcolo strutturale di telai piani e spaziali
(anche strutture reticolari, solai e travi di fondazione)

(versione 9.0)



Validazione del software

Autore

Ing. **Ciro Azzara**

Via E. Majorana, 8 – 90035 Marineo (PA)

Cell. 348 1514947

email ing.azzara@libero.it – azzara.ciro@gmail.com

<p>Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)</p>	<p>Validazione del software</p>	<p>Pag. 2 di 14</p>
---	--	---------------------

INDICE

1. PREMESSA	3
2. ESEMPI DI VALIDAZIONE DEL CODICE	3
Test di verifica n. 1 – Mensola	3
Test di verifica n. 2 – Trave con cedimento vincolare	4
Test di verifica n. 3 – Solaio a due campate in latero-cemento	5
Test di verifica n. 4 – Solaio a una campata e due sbalzi.....	7
Test di verifica n. 5 – Trave incastrata ed appoggiata	9
Test di verifica n. 6 – Calcolo telaio piano con carico termico	10
Test di verifica n. 7 – Travi con bi-pendolo interno	11
3. BIBLIOGRAFIA.....	14

1. PREMESSA

Di seguito vengono riportati alcuni esempi al fine di dare ulteriori chiarimenti sull'uso del software e per validare il codice di calcolo confrontando i risultati ottenuti con i risultati ottenuti manualmente e/o riscontrabili in letteratura tecnica e/o utilizzando altri software.

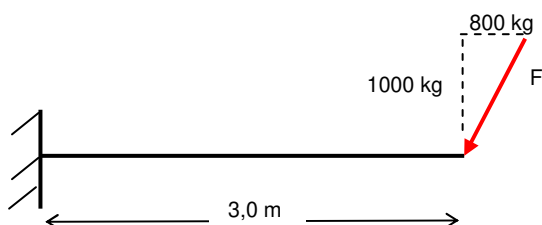
La taratura dei vari algoritmi di calcolo implementati, al fine di dimostrare l'attendibilità dei risultati, è una operazione fondamentale che va a tutela e garanzia dell'utente finale ed è espressamente prevista dalle NTC di cui al D.M. 14/01/2008 e al D.M. 17/01/2018 (capitolo 10), fermo restando che il progettista resta sempre e comunque unico responsabile dell'intera progettazione strutturale, come espressamente previsto dal penultimo comma del capitolo 10.1 dei citati Decreti Ministeriali.

Il progettista deve controllare l'affidabilità dei codici di calcolo utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

2. Esempi di validazione del codice

TEST DI VERIFICA N. 1 – MENSOLA

Effettuare l'analisi strutturale della seguente mensola in acciaio Fe 360 (profilo IPE 200) soggetta ad una forza F permanente all'estremità.



Trattasi di una struttura piana isostatica facilmente risolvibile con le sole equazioni di equilibrio. Lo sforzo normale è costante lungo tutta l'asta e vale -800 kg (di compressione), lo sforzo di taglio è anch'esso costante e vale 1000 kg, il momento flettente è lineare con valore nullo all'estremo libero e valore 3.000 kgm all'incastro.

Con il software *Telai.Az* si ottengono gli stessi identici risultati. Si riporta uno stralcio del tabulato di calcolo:

VERIFICHE DI RESISTENZA

ASTA 1 (materiale: Acciaio)

verifica di resistenza (per ogni combinazione di carico)

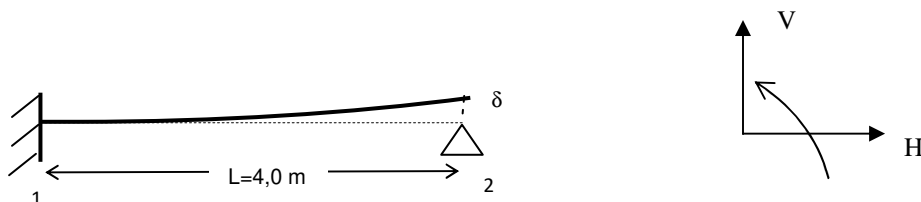
x	Comb.	Nx(x)	Tz(x)	My(x)	Sig_id_m	Verif?
0	COMB1	-800	1000	-3000	1572,6	Si
37,5	COMB1	-800	1000	-2625	1379,7	Si
75	COMB1	-800	1000	-2250	1186,8	Si
112,5	COMB1	-800	1000	-1875	993,9	Si

<p align="center">Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)</p>	<p align="center">Validazione del software</p>	<p align="center">Pag. 4 di 14</p>
--	---	------------------------------------

150	COMB1	-800	1000	-1500	801,1	Si
187,5	COMB1	-800	1000	-1125	608,4	Si
225	COMB1	-800	1000	-750	416	Si
262,5	COMB1	-800	1000	-375	245,6	Si
300	COMB1	-800	1000	0	169,2	Si

TEST DI VERIFICA N. 2 – TRAVE CON CEDIMENTO VINCOLARE

Effettuare l'analisi strutturale della seguente struttura piana in cui l'appoggio di destra ha subito un cedimento pari a $\delta=5$ cm rispetto alla posizione indeformata. La trave ha sezione rettangolare 30x50 cm ($I_y=30 \times 50^3/12=312.500 \text{ cm}^4$), realizzata in cls con modulo elastico longitudinale pari a $E=280.000 \text{ kg/cm}^2$.



Trattasi di una struttura iperstatica per la quale adottando le soluzioni classiche della Scienza delle Costruzioni si ricava (segni positivi come in figura):

- rotazione al nodo due $\gamma_2 = \frac{3\delta}{2L} = \frac{3 \cdot 5}{2 \cdot 400} = 0,01875 \text{ rad}$ (in senso antiorario)

- reazione vincolare all'incastro:

$$H_1 = 0$$

$$V_1 = -\frac{3EI_y \delta}{L^3} = -\frac{3 \cdot 280000 \cdot 312500 \cdot 5}{400^3} = -20.507,81 \text{ kg} \quad (\text{diretta cioè verso il basso})$$

$$M_1 = -\frac{3EI_y \delta}{L^2} = -\frac{3 \cdot 280000 \cdot 312500 \cdot 5}{400^2} = -8.203.125 \text{ kg} \cdot \text{cm} \quad (\text{verso orario})$$

- reazione vincolare all'appoggio:

$$H_2 = 0$$

$$V_2 = \frac{3EI_y \delta}{L^3} = \frac{3 \cdot 280000 \cdot 312500 \cdot 5}{400^3} = 20.507,81 \text{ kg} \quad (\text{verso l'alto})$$

$$M_2 = 0$$

Effettuato l'input e risolta la struttura con *Telai.Az* si ottengono gli stessi risultati:

Combinazione di carico: COMB1

CARICHI UNIFORMI. DISTRIBUITI SULLE ASTE

Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 5 di 14
---	---------------------------------	--------------

Asta	qx	qz	my
1	0	0	0

CARICHI SUI NODI

Nodo	FX	FY	CZ
1	0	0	0
2	0	0	0

SPOSTAMENTI DEI NODI

Nodo	deltaX (cm)	deltaY (cm)	rotaz.
1	0	0	0
2	0	-5	-0,01875

REAZIONI VINCOLARI

Nodo	RX (kg)	RY (kg)	CZ (kg*m)
1	0	20507,81	82031,23
2	0	-20507,81	0

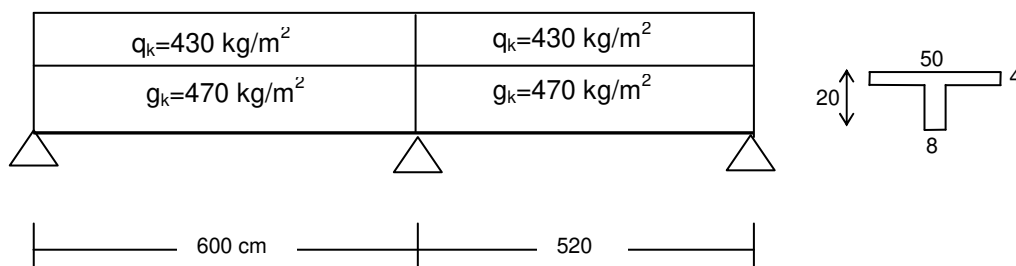
CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE DI ESTREMITA' DELLE ASTE

Asta	Nik	Tik	Mik	Nki	Tki	Mki
1	0	20507,81	82031,23	0	-20507,81	0

Come si può notare i risultati (spostamenti e reazioni vincolari) ottenuti con *Telai.Az* sono perfettamente corrispondenti alla soluzione analitica prima indicata.

TEST DI VERIFICA N. 3 – SOLAIO A DUE CAMPATE IN LATERO-CEMENTO

Sia dato il seguente solaio, riportato nel testo [1] indicato in bibliografia, in C.A. con sezione a T con due campate e 3 appoggi (trave continua iperstatica) soggetto a carico permanente e accidentale in 4 combinazioni di carico:



Il calcestruzzo è $R_{ck}=300 \text{ kg/cm}^2$ con $E_c=314.471 \text{ kg/cm}^2$

Le combinazioni di carico da considerare sono:

Combinazione di carico	Carichi agenti
n. 1	solo g_k

Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 6 di 14
---	---------------------------------	--------------

n. 2	solo q_k nella prima campata
n. 3	solo q_k nella seconda campata
n. 4	Carico permanente g_k + carico accidentale q_k nelle due campate

Definite le tre seguenti forme di carico da inserire nel software:

PERM (permanente)

SOVR1 (sovraccarico 1^a campata)

SOVR2 (sovraccarico 2^a campata)

le tre combinazioni di carico da considerare sono:

COMB1=PERM (moltiplicatore 1,0)

COMB2=SOVR1 (1,0)

COMB3=SOVR2 (1,0)

COMB4=PERM (1,0) + SOVR1 (1,0) + SOVR2 (1,0)

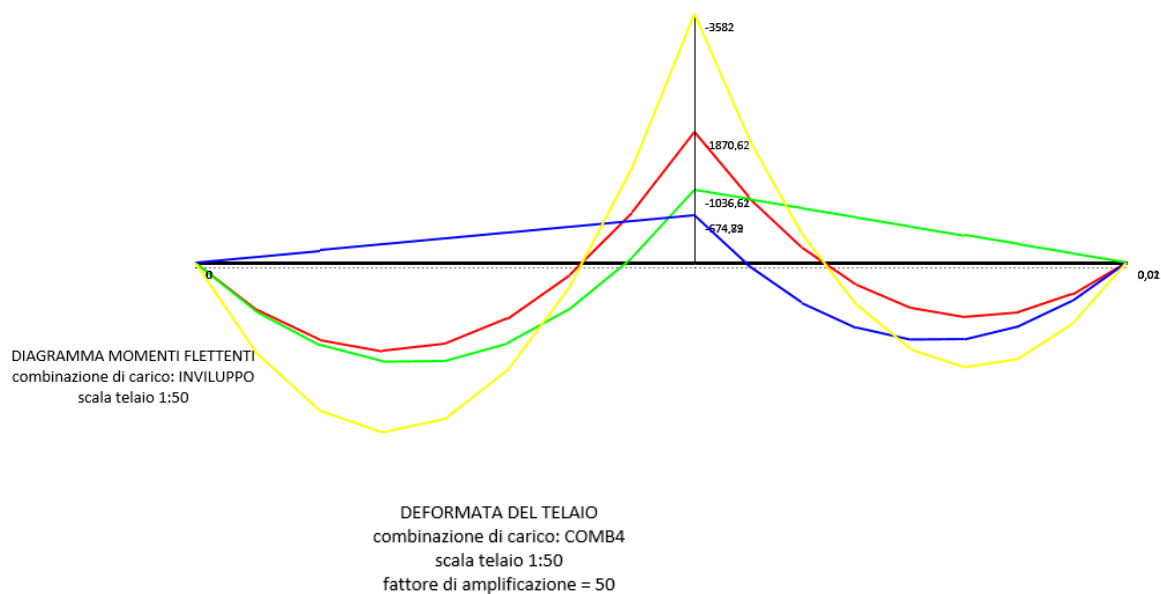
Risultati

Combinazione di carico	Momento flettente all'appoggio centrale (kgm)		
	soluzione Toniolo	Soluzione Telai.Az	Scarto %
n. 1	-1870,6	-1870,6	0,00%
n. 2	-1036,6	-1036,6	0,00%
n. 3	-674,8	-674,8	0,00%
n. 4	-3582,0	-3582,0	0,00%

Combinazione di carico	freccia massima prima campata (mm)			freccia massima seconda campata (mm)		
	Toniolo	Telai.Az	Scarto %	Toniolo	Telai.Az	Scarto %
n. 1	+5,47	+5,48	0,18%	+1,93	+1,93	0,00%
n. 2	+7,24	+7,25	0,14%	-2,58	-2,58	0,00%
n. 3	-2,24	-2,23	0,45%	+4,34	+4,35	0,23%
n. 4	+10,48	+10,49	0,09%	+3,70	+3,70	0,00%

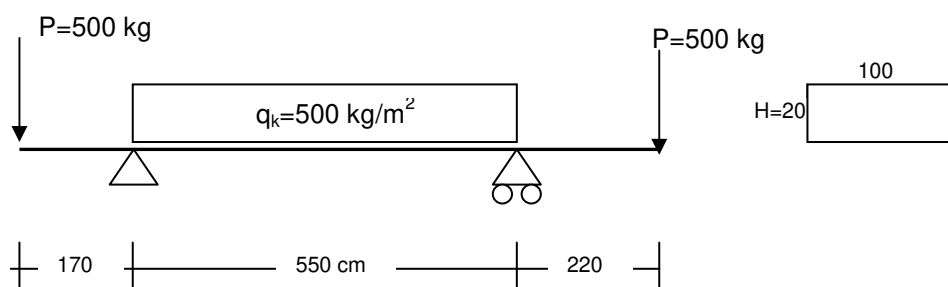
Come si può notare esiste una perfetta corrispondenza dei risultati ottenuti con il software *Telai.Az* rispetto a quelli desunti dall'autorevole testo ingegneristico preso a riferimento.

Nel seguito si riporta il diagramma dei momenti flettenti per tutte le combinazioni di carico esaminate e la deformata per la combinazione di carico n. 4



TEST DI VERIFICA N. 4 – SOLAIO A UNA CAMPATA E DUE SBALZI

Sia dato il seguente solaio, riportato nel testo [2] indicato in bibliografia, in C.A. con sezione rettangolare con una campata e due sbalzi (trave continua isostatica), soggetto a carichi permanenti e accidentali in 2 combinazioni di carico:



Il calcestruzzo è $R_{ck}=350 \text{ kg/cm}^2$ con $E_c=323.082 \text{ kg/cm}^2$. Il momento di inerzia della sezione è $I_y=66.666,67 \text{ cm}^4$.

Le combinazioni di carico da considerare sono:

Combinazione di carico	Carichi agenti
n. 1	P sbalzo sinistra + q_k + P sbalzo destra
n. 2	P sbalzo sinistra + P sbalzo destra

Definite le due seguenti forme di carico da inserire nel software:

Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 8 di 14
---	---------------------------------	--------------

PERM (permanente agli sbalzi)

SOVR (sovraccarico campata)

le due combinazioni di carico si scrivono:

COMB1 = PERM (moltiplicatore 1,0) + SOVR (1,0)

COMB2 = PERM (1,0)

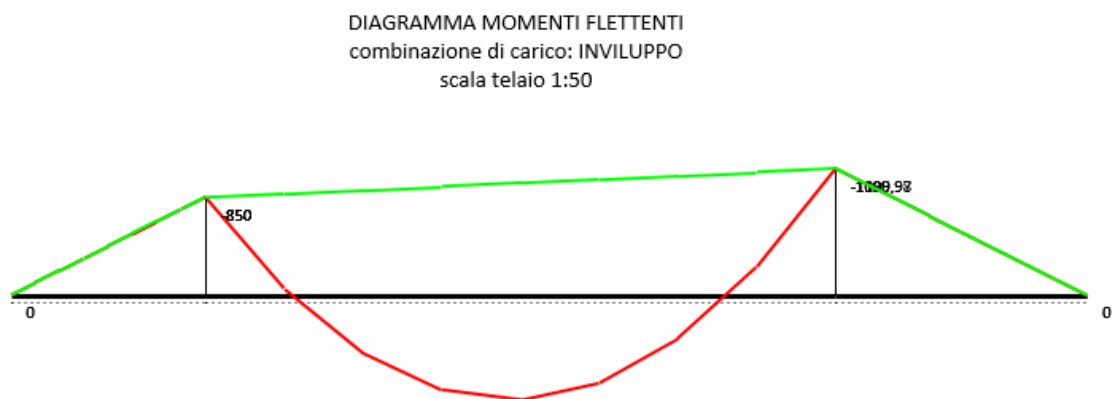
Risultati

Combinazione di carico	rotazione sezione di appoggio a sx (rad/1000)			rotazione sezione di appoggio a dx (rad/1000)		
	Belluzzi	Telai.Az	Scarto %	Belluzzi	Telai.Az	Scarto %
n. 1	+4,17	+4,20	0,7%	-3,11	-3,10	0,3%
n. 2	-1,19	-1,19	0,0%	+1,29	+1,30	0,8%

Combinazione di carico	Spostamento estremità sbalzo sx (mm)			freccia campata centrale (mm)			Spostamento estremità sbalzo dx (mm)		
	Belluzzi	Telai.Az	Scarto %	Belluzzi	Telai.Az	Scarto %	Belluzzi	Telai.Az	Scarto %
n. 1	-0,32	-0,33	3,1%	+1,05	+1,05	0,0%	+0,13	+0,14	7%
n. 2	+2,40	+2,41	0,4%	-1,72	-1,71	0,6%	+3,67	+3,68	0,3%

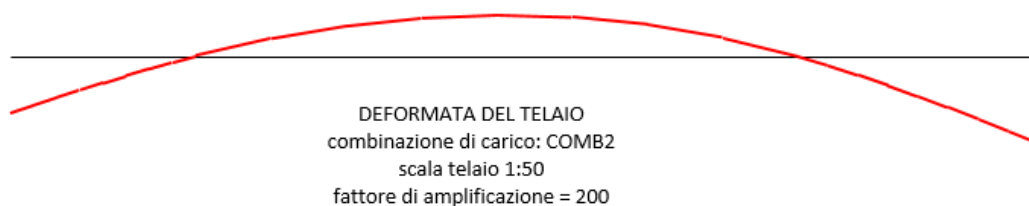
Come si può notare esiste una perfetta corrispondenza dei risultati ottenuti¹ con il software *Telai.Az* rispetto a quelli desunti dall'autorevole testo ingegneristico preso a riferimento.

Nel seguito si riporta il diagramma dei momenti flettenti per tutte le combinazioni di carico esaminate e la deformata per la combinazione di carico n. 2



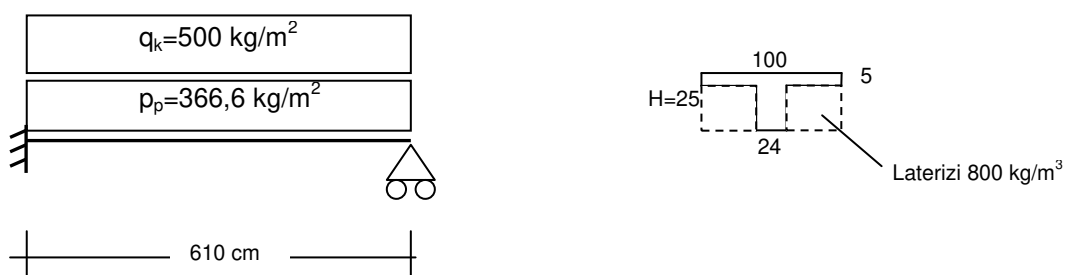
¹ Scarti superiori all'1% sono dovuti all'arrotondamento di valori numerici prossimi allo zero e non sono quindi indici di discordanze vere e proprie.

Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 9 di 14
---	---------------------------------	--------------



TEST DI VERIFICA N. 5 – TRAVE INCASTRATA ED APPOGGIATA

Sia data la seguente trave, riportata nel testo [3] indicato in bibliografia, in C.A. con sezione a T con una campata (trave iperstatica), soggetta al carico permanente dovuto al peso proprio e a carico accidentale:



Il calcestruzzo è $R_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$ con $E_c = 314.472 \text{ kg/cm}^2$ e peso specifico 2.500 kg/m^3 .
Il momento di inerzia della sezione è $I_y = 55.307 \text{ cm}^4$.

Le combinazioni di carico da considerare sono:

Combinazione di carico	Carichi agenti
n. 1	Peso proprio + sovraccarico

Definite le due seguenti forme di carico da inserire nel software:

PERM (permanente peso proprio)

SOVR (sovraccarico campata)

le due combinazioni di carico si scrivono:

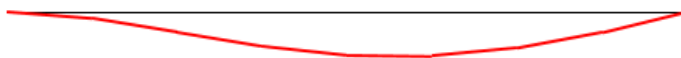
COMB1 = PERM (1,0) + SOVR (1,0)

Risultati

Combinazione di carico	Momento all'incastro (kgm)			Freccia massima campata (mm)		
	Colombo	Telai.Az	Scarto %	Colombo	Telai.Az	Scarto %
n. 1	-4030,8	-4030,8	0,0%	3,725	3,68	1,2%

Nel seguito si riporta la deformata:

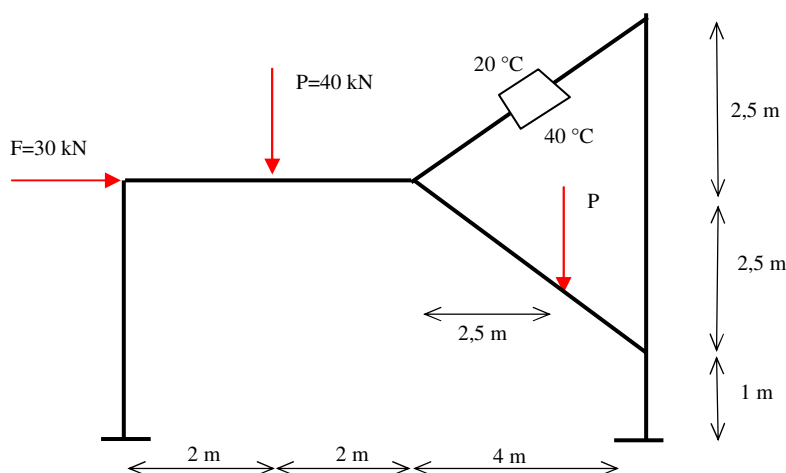
Telai.Az 9.0 <i>(Ing. Ciro Azzara)</i>	Validazione del software	Pag. 10 di 14
--	---------------------------------	---------------



DEFORMATA DEL TELAIO
combinazione di carico: COMB1
scala telaio 1:50
fattore di amplificazione = 100

TEST DI VERIFICA N. 6 – CALCOLO TELAIO PIANO CON CARICO TERMICO

Sia dato il seguente telaio piano speciale in C.A., riportato nella dalla pubblicazione on-line [4], soggetto ad azioni permanenti e a un carico termico:



Le aste hanno tutte sezione rettangolare con $B=30$ cm e $H=50$ cm. Il coefficiente di dilatazione termica è pari a $\alpha=10 \times 10^{-6}=0,00001$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Il materiale ha $R_{ck}=30$ N/mm^2 con $E_c=31.220$ MPa ($=\text{N}/\text{mm}^2$).

Analisi con Telai.Az

Occorre definire due forme di carico:

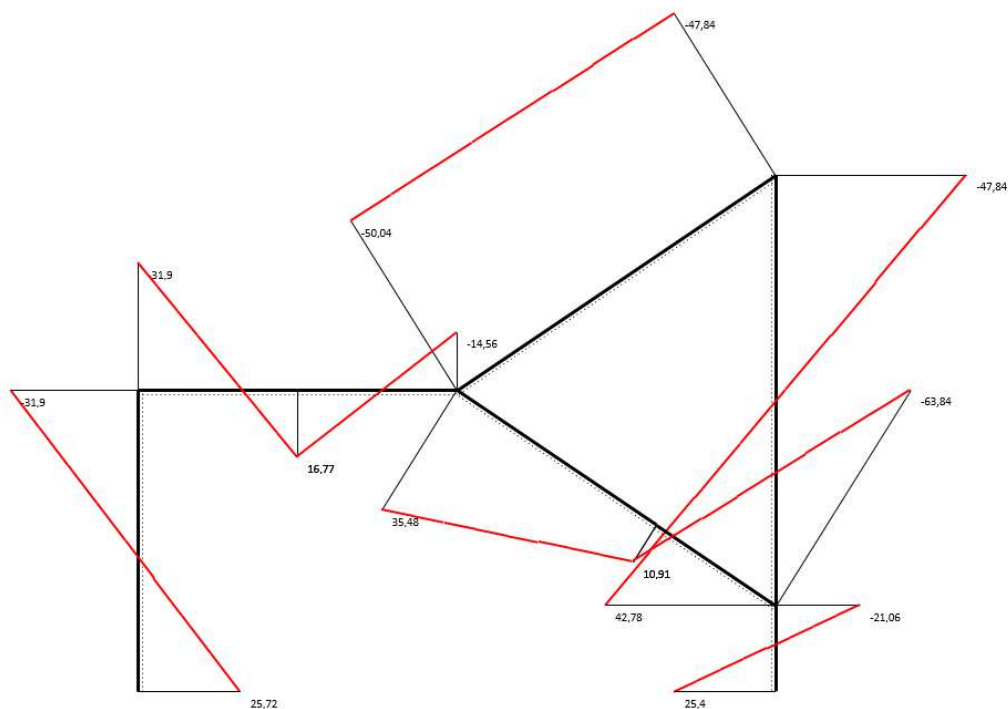
- 1) PERM (permanente)
- 2) TEMP (temperatura).

Dal pannello COMB. CARICO definire l'unica combinazione di carico:

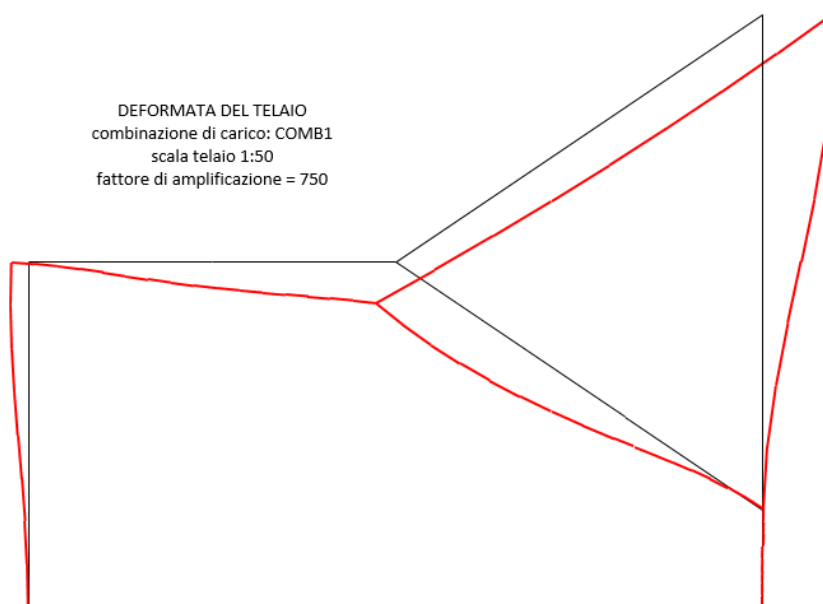
COMB1 = PERM (moltiplicatore 1,3) + TEMP (moltiplicatore 1,5)

Qui si riporta il diagramma dei momenti flettenti:

Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)	Validazione del software	Pag. 11 di 14
---	---------------------------------	---------------



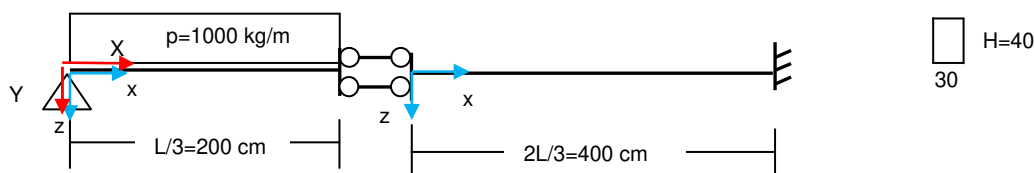
e la deformata del telaio:



I risultati ottenuti con *Telai.Az* corrispondono perfettamente con quelli riportati nella pubblicazione citata.

TEST DI VERIFICA N. 7 – TRAVI CON BI-PENDOLO INTERNO

Sia data la seguente struttura isostatica, riportata nel testo [5] indicato in bibliografia, in C.A. con travi a sezione rettangolare soggetta a carico permanente uniforme nella prima trave in una combinazione di carico:



Il calcestruzzo è $R_{ck}=300 \text{ kg/cm}^2$ con $E_c=300.000 \text{ kg/cm}^2$. Il momento di inerzia delle sezioni è $I_y=1/12BH^3=160.000 \text{ cm}^4$.

L'autore risolve la struttura con l'equazione della linea elastica applicata alle due travi, ottenendo un sistema di 8 equazioni in 8 incognite (nel bipendolo interno si impone che la rotazione è unica, il momento flettente è unico e il taglio è nullo sia per la fine della prima trave che all'inizio della seconda trave). Gli spostamenti delle due travi lungo z sono dati dalle seguenti espressioni:

$$w_1(x) = \frac{x(32L^3 - 36Lx^2 + 27x^3)}{648} \cdot \frac{p}{E \cdot I_y} \quad w_2(x) = -\frac{L^2(2L - 3x^2)^2}{324} \cdot \frac{p}{E \cdot I_y}$$

da cui derivando si ottengono le espressioni delle rotazioni, momenti flettenti e tagli:

$$\phi_1(x) = -\frac{(8L^3 - 27Lx^2 + 27x^3)}{162} \cdot \frac{p}{E \cdot I_y} \quad \phi_2(x) = -\frac{L^2(2L - 3x)}{54} \cdot \frac{p}{E \cdot I_y}$$

$$M_{y1}(x) = \frac{p}{6} \cdot (2L - 3x) \cdot x \quad M_{y2}(x) = \frac{p \cdot L^2}{18}$$

$$T_{z1}(x) = \frac{p}{3} \cdot (L - 3x) \quad T_{z2}(x) = 0$$

Le reazioni vincolari, facilmente deducibili con le equazioni di equilibrio, valgono:

- all'appoggio: $V_1 = -pL/3 = -2000 \text{ kg}$
- nel bipendolo: $M_2 = pL^2/18 = 2000 \text{ kgm}$
- all'incastro: $V_3 = 0$, $M_3 = pL^2/18 = 2000 \text{ kgm}$

Risolta la struttura con Telai.Az si ottengono gli stessi precisi risultati:

SPOSTAMENTI DEI NODI

Nodo	deltaX (cm)	deltaY (cm)	rotaz. (rad)
1	0	0	0,00222
2	0	0,4	0,00167
3	0	0	0

REAZIONI VINCOLARI

Nodo	RX (kg)	RY (kg)	CZ (kg*m)
1	0	-2000	0
3	0	0	-2000

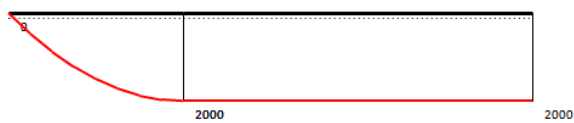
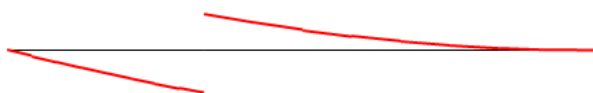


DIAGRAMMA MOMENTI FLETTENTI
combinazione di carico: COMB.1
scala telaio 1:50
scala momenti 1 cm = 1000 kg*m



DIAGRAMMA SFORZO DI TAGLIO
combinazione di carico: COMB.1
scala telaio 1:50
scala taglio 1 cm = 1000 kg



DEFORMATA DEL TELAIO
combinazione di carico: COMB.1
scala telaio 1:50
fattore di amplificazione = 100

<p>Telai.Az 9.0 (Ing. Ciro Azzara)</p>	<p>Validazione del software</p>	<p>Pag. 14 di 14</p>
---	--	----------------------

3. BIBLIOGRAFIA

- [1] Giandomenico Toniolo, *Tecnica delle costruzioni Vol. 2A Cemento armato calcolo agli stati limite*, Zanichelli Edizione 2004, pagine da 344 a 349
- [2] Odone Belluzzi, *Scienza delle Costruzioni Vol. 1*, Zanichelli edizione, agosto 1979, pag. 382-383, esercizio n. 261
- [3] Giuseppe Colombo, *Manuale dell'ingegnere*, Hoepli, 80° edizione, pag. 646, esempio n. 4
- [4] <https://www.unikore.it/phocadownload/userupload/giuseppe.macaluso2-unikore.it/risoluzione%20telaio%20con%20metodo%20%20matriciale.pdf>
- [5] Claudio Franciosi, *Lezioni di Scienza delle Costruzioni*, 17/05/2015, pag. 370, <http://www.scienzadellecostruzioni.co.uk/Provvisori/Lezioni.pdf>