

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

PROGETTAZIONE E VERIFICA DI SEZIONI IN ACCIAIO MEDIANTE PROGRAMMAZIONE OOP

Tutor universitari:

Prof. Gianluca Mazzucco

Prof.ssa Beatrice Pomaro

Laureando: *Tommaso Zara*

Padova, 26/09/2023

Nell'ambito dell'ottimizzazione dei processi di verifica e design di elementi monodimensionali in acciaio, si è sviluppata una procedura automatica per lo studio di sezioni soggette a sollecitazioni assiali e flessionali.

Partendo dalla formulazione di solido monodimensionale di Eulero-Bernoulli e la relativa risoluzione di De Saint-Venant, la verifica delle sezioni avviene tramite il metodo alle Tensioni Ammissibili (TA).

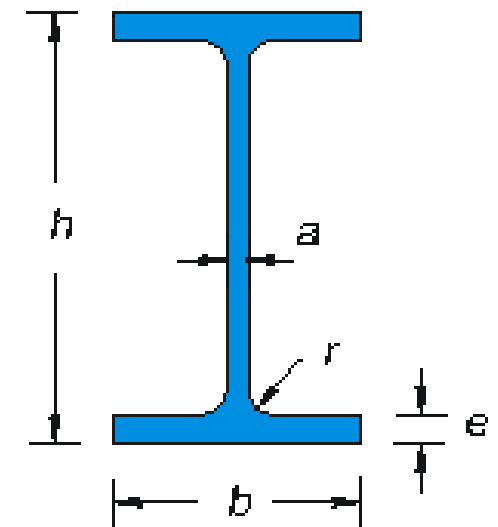


Le tensioni ortogonali alla sezione sono funzione di

- sforzo normale N
- momenti flettenti nel piano della sezione M_x e M_y
- area della sezione
- momenti d'inerzia calcolati rispetto ai due assi contenuti nel piano della sezione I_x e I_y

Tale funzione è l'equazione di Navier:

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x$$



Tutte le sezioni trasversali di un solido monodimensionale possono essere discretizzate mediante poligoni chiusi lineari a tratti.

Il problema di De Saint-Venant è un problema della teoria della elasticità, nell'ambito della meccanica dei solidi, riguardante un solido cilindrico non vincolato dove sono assenti forze di volume, carichi applicati solo agli estremi della trave e materiale elastico-lineare, isotropo e omogeneo.

Tale problema è stato risolto da Barré de Saint-Venant nel 1855 grazie al metodo semi-inverso.

Il metodo semi-inverso consiste in:

1. Non definire i carichi, saranno una condizione al contorno;
2. Caratterizzare a priori alcuni aspetti della soluzione cercata;
3. Utilizzare le equazioni base del problema, ovvero le equazioni di equilibrio, di congruenze e costitutive;
4. Imporre le condizioni al contorno sulla superficie laterale e sulle due basi per imporre i carichi alla soluzione trovata.

Equazioni indefinite di equilibrio

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

Equazioni di compatibilità (per piccoli spostamenti)

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases}$$

Equazioni al contorno sulla superficie laterale

$$\begin{cases} \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y = 0 \\ \tau_{yz} n_x + \sigma_y n_y = 0 \\ \tau_{zx} n_x + \tau_{yz} n_y = 0 \end{cases}$$

Equazioni di congruenza interna

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial x \partial z} \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \end{cases}$$

Equazioni costitutive

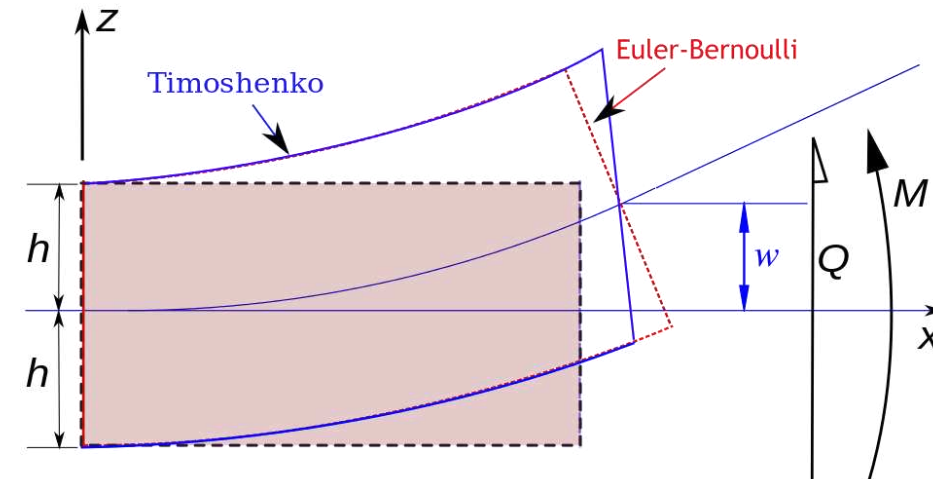
$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x - \nu \sigma_z) \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \sigma_x - \nu \sigma_y) \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \end{cases}$$

Ipotesi: assenza di scorrimenti tra le sezioni.

Conseguenze:

- Le sezioni hanno un comportamento rigido piano e rimangono ortogonali all'asse, non è presente ingobbamento delle stesse;
- Il modulo di taglio tende ad infinito;
- Lo sforzo di taglio viene ricavato dalle equazioni indefinite di equilibrio;
- La cinematica della trave è descritta dalla configurazione deformata dell'asse baricentrico, ovvero dalla linea elastica.

Alternativa: un altro modello costitutivo possibile consiste nel modello di Timoshenko in cui cade l'ipotesi del modello di Eulero-Bernoulli, tuttavia nelle normali applicazioni ingegneristiche risulta sufficientemente accurato e più semplice da utilizzare il modello di Eulero-Bernoulli.



L'equazione di Navier si può ottenere applicando il metodo semi-inverso di De Saint-Venant.

1. Si scrivono le equazioni inerenti al problema.
2. Grazie alla terza equazione indefinita di equilibrio si giunge al risultato a lato.
3. Si scrive una soluzione generica a priori.
4. Sostituendo la soluzione trovata nelle relazioni di equivalenza statica e ipotizzando un sistema di riferimento principale d'inerzia (ovvero momenti statici e momento centrifugo nullo) si giunge all'equazione di Navier.

$$1. \quad \begin{cases} \iint_{S_1} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \right) dS = \int_{\Gamma} (\tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y) d\Gamma \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \\ \tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y = 0 \end{cases}$$

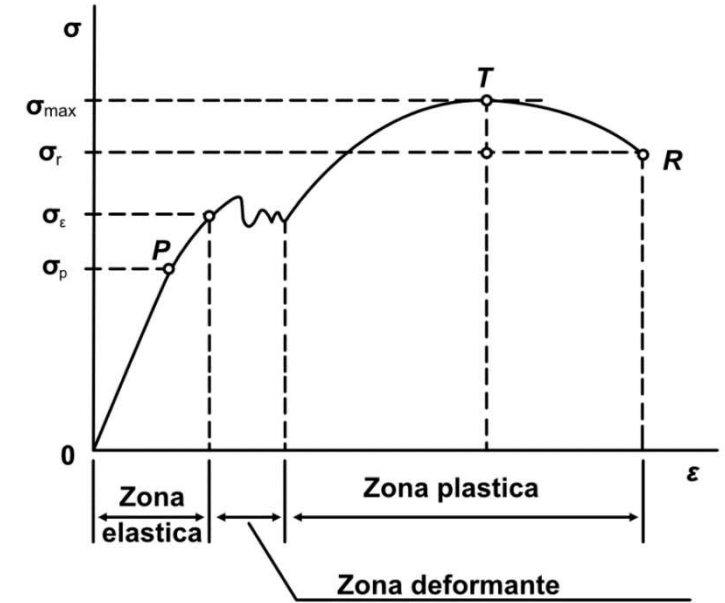
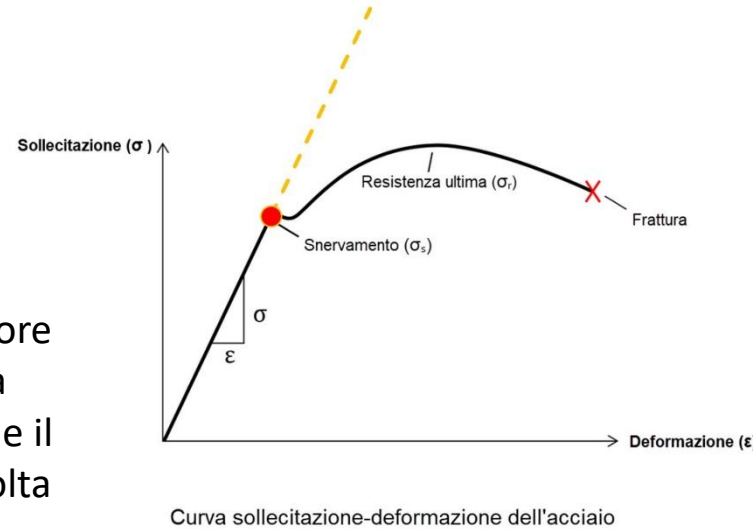
$$2. \quad \Rightarrow \iint_{S_1} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dS = 0$$

$$3. \quad \sigma_z = a + bx + cy - z(a_1 + b_1x + c_1y)$$

$$4. \quad \begin{cases} N = \iint_{S_1} \sigma_z dS \\ M_x = \iint_{S_1} \sigma_z y dS \\ M_y = \iint_{S_1} -\sigma_z x dS \end{cases} \Rightarrow \sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x$$

Il metodo alle Tensioni Ammissibili trae origine dal comportamento elasto-plastico dell'acciaio.

In particolare, si osserva un iniziale comportamento elastico, ovvero all'applicazione di un certo carico la deformazione subita dal materiale sarà di tipo elastico, ma se il carico supera un valore critico (il limite di snervamento) si innesca un comportamento plastico a cui consegue il mantenimento della deformazione una volta scaricato il materiale stesso.



La transizione dal comportamento elastico al comportamento elasto-plastico può essere più o meno marcata a seconda del tipo di acciaio.

In ambito strutturale è necessario non superare la tensione di snervamento. Inoltre, per una maggiore sicurezza, la tensione limite non può superare una certa tensione ammissibile, inferiore alla tensione di snervamento.

Tale tensione ammissibile si ottiene dividendo la tensione di snervamento per il coefficiente di sicurezza scelto o dettato da normativa.

$$\longrightarrow \quad \boxed{\sigma_z \leq \frac{\sigma_s}{\gamma}} \quad \text{Con } \gamma > 1$$

OBIETTIVO



Realizzazione di un codice numerico (sviluppato in linguaggio C++) per la risoluzione di sezioni piane soggette a sollecitazioni assiali e flessionali.

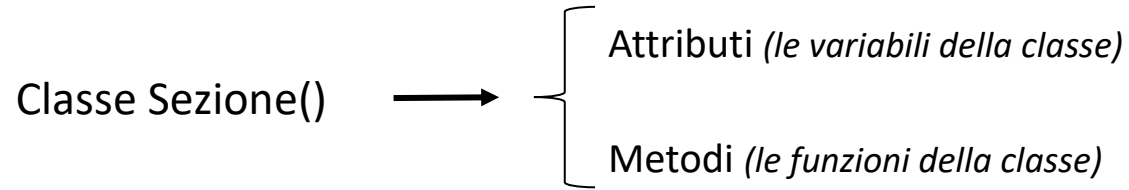
SVILUPPO



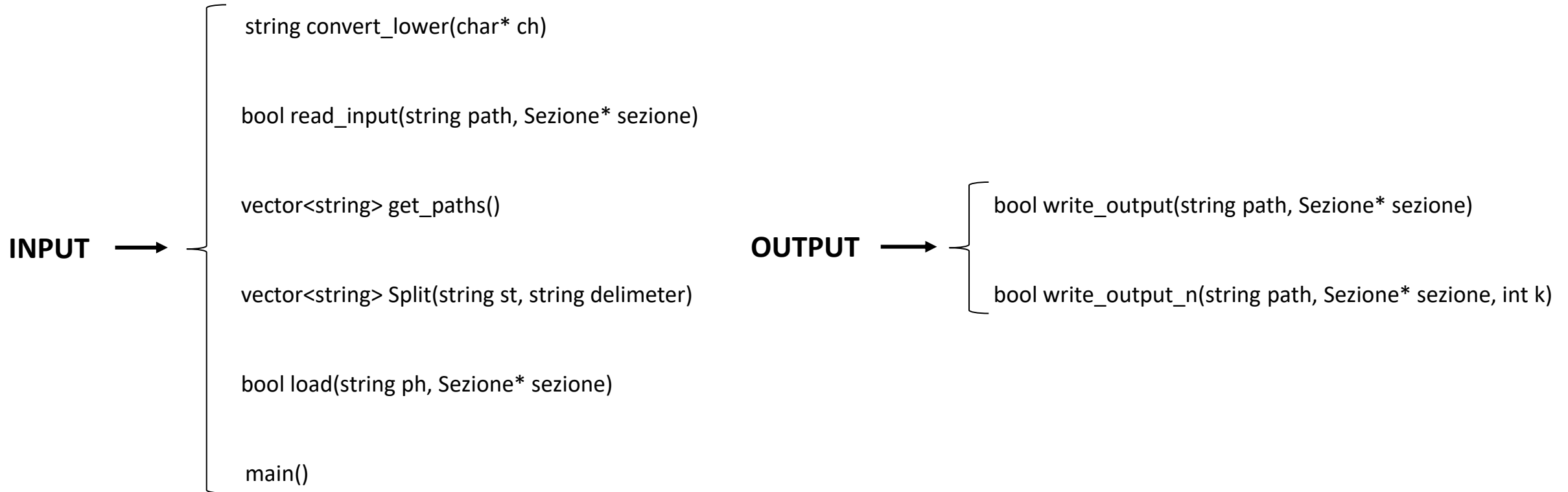
1. Determinazione dei parametri geometrici della sezione nota la nuvola di punti che ne determina il profilo.
2. Note le condizioni di carico si definisce lo stato tensionale della sezione in ogni suo punto.
3. Verifica di resistenza mediante il metodo alle Tensioni Ammissibili.

- Il linguaggio utilizzato per scrittura del codice atto alla verifica delle sezioni piane di trave è il C++.
- Il linguaggio C++ è derivato dal linguaggio C. È caratterizzato da introdurre nel linguaggio C la programmazione orientata agli oggetti.
- La programmazione orientata agli oggetti permette di gestire progetti di grandi dimensioni, di organizzare meglio il codice e di riutilizzare parte di codice in caso di bisogno.
- Nelle prossime slide saranno mostrati gli argomenti dei metodi definiti nella classe Sezione().

```
class CartalDentita {  
    private:  
        Persona* possessore;  
        char numero[20];  
    public:  
        CartalDentita (char* numcarta);  
        void associaPersona(Persona* partner);  
};  
class Persona {  
    private:  
        CartalDentita* documento;  
    public:  
        void associaCartalDentita(CartalDentita* partner);  
};
```

Funzioni utilizzate per l'input e l'output



AREA

$$A_{\nabla} = \frac{x_{i+1} y_i - x_i y_{i+1}}{2}$$

```
double Sezione::Area()
{
    int dim = punti.size();

    //Utilizzo la property "A" così l'area della sezione rimane "salvata"
    //all'interno della variabile
    A = 0.0;
    for (int i = 0; i < dim - 1; i++) {
        A += (punti[i + 1][0] * punti[i][1] - punti[i][0] * punti[i + 1][1]) / 2.0;
    }
    A = abs(A);
    return A;
}
```

**MOMENTO
STATICO**

$$S_{x_{\nabla}} = A_{\nabla} y_B$$

```
double Sezione::MomStatx()
{
    int dim = punti.size();

    Sx = 0.0;
    for (int i = 0; i < dim - 1; i++)
    {
        double yb = (punti[i + 1][1] + punti[i][1]) / 3;
        double a = (punti[i + 1][0] * punti[i][1] - punti[i][0] * punti[i + 1][1]) / 2.0;
        Sx += a * yb;
    }
    return Sx;
}
```

**MOMENTO
D'INERZIA**

$$I_{x_{\nabla}} = \frac{A_{\nabla} (y_i^2 + y_{i+1}^2 + y_i y_{i+1})}{6}$$

```
double Sezione::Inerziax()
{
    int dim = punti.size();

    lx = 0.0;
    for (int i = 0; i < dim - 1; i++)
    {
        double a = (punti[i + 1][0] * punti[i][1] - punti[i][0] * punti[i + 1][1]) / 2.0;
        lx += a * (pow(punti[i][1], 2) + pow(punti[i + 1][1], 2) + punti[i][1] * punti[i + 1][1]) / 6;
    }
    return lx;
}
```

**MOMENTO
D'INERZIA
CENTRIFUGO**

$$I_{xy_{\nabla}} = \frac{A_{\nabla} \left(x_i y_i + \frac{x_i y_{i+1}}{2} + \frac{x_{i+1} y_i}{2} + x_{i+1} y_{i+1} \right)}{6}$$

```
double Sezione::Inerziaxy()
{
    int dim = punti.size();

    lxy = 0.0;
    for (int i = 0; i < dim - 1; i++)
    {
        double a = (punti[i + 1][0] * punti[i][1] - punti[i][0] * punti[i + 1][1]) / 2.0;
        lxy += a * (punti[i][0] * punti[i][1] + punti[i][0] * punti[i + 1][1] / 2 + punti[i + 1][0] * punti[i][1] / 2 + punti[i + 1][0] * punti[i + 1][1]) / 6;
    }
    return lxy;
}
```

Link ai file di testo di input e output



```

1 D:/Cartelle Varie/Desktop/sezione.dat
2 D:/Cartelle Varie/Desktop/provecariconew.dat
3 D:/Cartelle Varie/Desktop/output.txt
4 D:/Cartelle Varie/Desktop/output_n.txt

```

Scrittura dei nodi nel primo file di testo



```

sezione.dat
1 points
2 0, 0
3 0, 6
4 17, 6
5 17, 40
6 23, 40
7 23, 6
8 40, 6
9 40, 0
10 end

```

Scrittura delle combinazioni di carico nel secondo file di testo



```

1 CombinazioneDiCaricol
2 Fz, 7800
3 Mx, 57000
4 My, -34000
5 end
6
7 CombinazioneDiCarico2
8 Fz, -4500
9 Mx, -7500
10 My, -1200
11 end

```

Console



```
E = 200000
fy = 300
ni = 1
A = 444
Sx = 5412
Sy = 8880
Ix = 130448
Iy = 210212
Ixy = 108240
```

```
sigmaN = 17.5676
sigmaMx = 24.5847
sigmaMy = -20.8512
```

File di testo



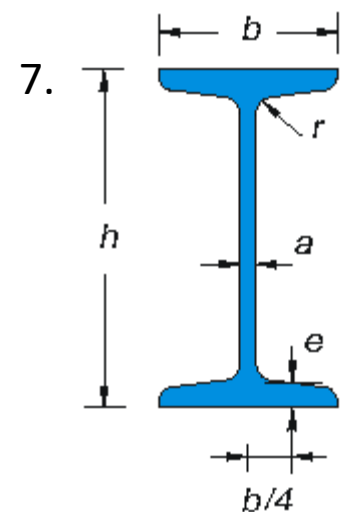
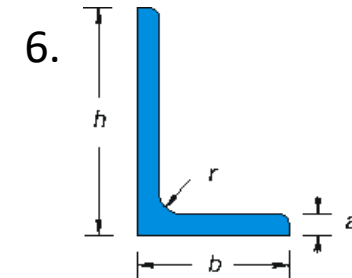
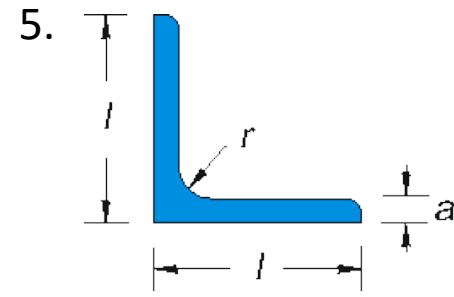
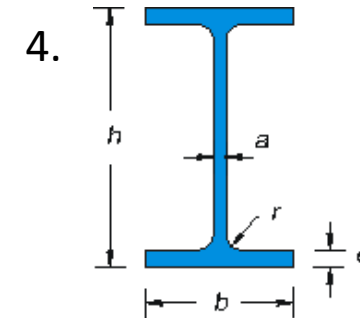
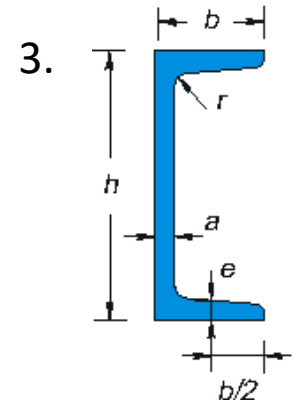
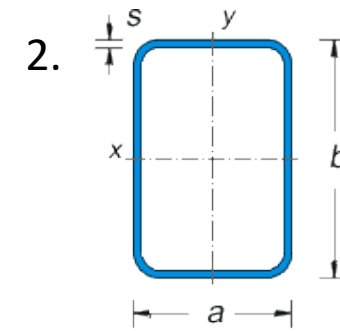
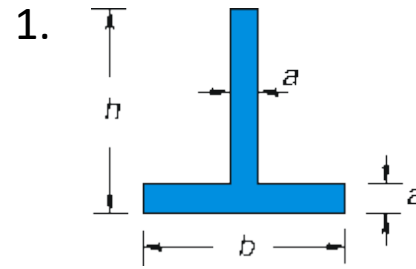
```
1
-----
(-19.17 ; -90.00)
-----
sigmaN = -3.435676
sigmaMx = -430.994297
sigmaMy = 36.252946
sigmaTOT = -398.177028
NON VERIFICATA
-----
(-19.17 ; 90.00)
-----
sigmaN = -3.435676
sigmaMx = 430.994297
sigmaMy = 36.252946
sigmaTOT = 463.811567
NON VERIFICATA
-----
(50.83 ; 90.00)
-----
sigmaN = -3.435676
sigmaMx = 430.994297
sigmaMy = -96.126094
sigmaTOT = 331.432527
VERIFICATA
-----
```

Le sezioni verificate sono le seguenti:

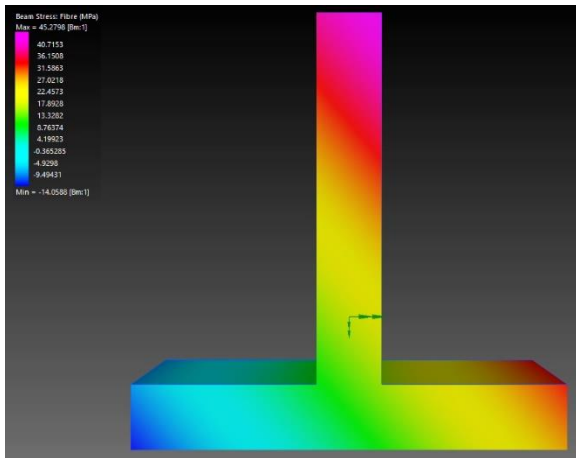
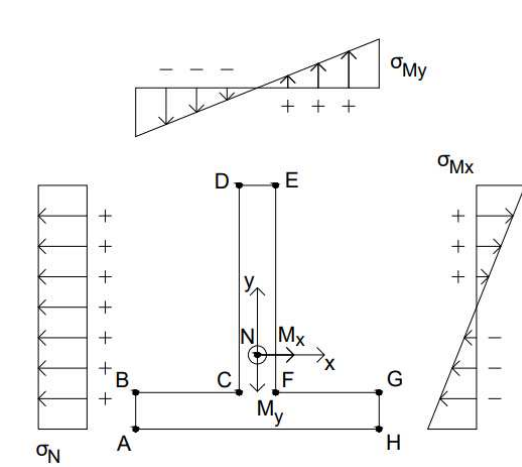
1. Profilo a T
2. Profilo rettangolare scatolare
3. Profilo a C (UPN, UNI 5680-73)
4. Profilo a doppio T (IPE)
5. Profilo a L con ali uguali (UNI 5783-66)
6. Profilo a L con ali disuguali (UNI 5784-66)
7. Profilo a doppio T (IPN)

Ogni sezione è stata verificata con due combinazioni di carico e per ogni combinazione di carico è presente uno schema che indica l'andamento a farfalla delle tensioni e l'andamento delle tensioni calcolato per mezzo di Straus⁷

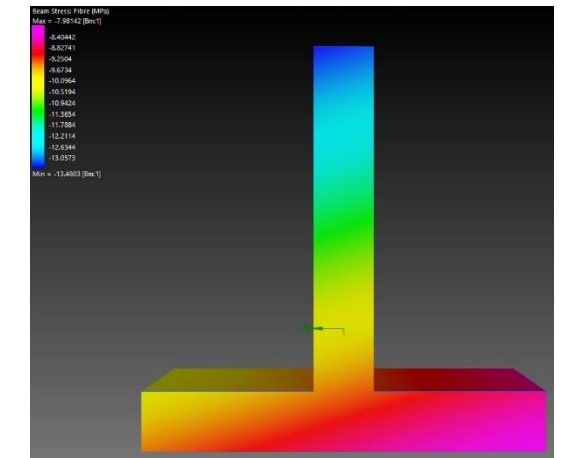
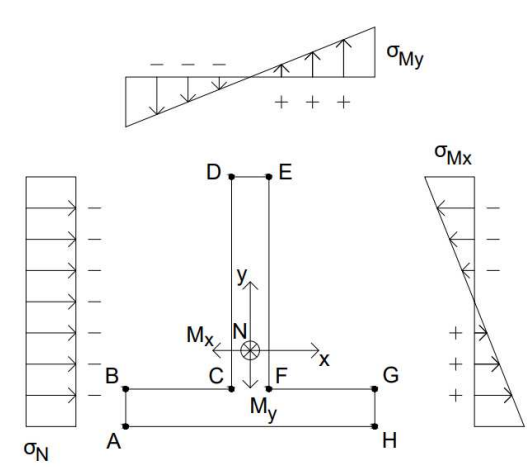
Inoltre, è presente una tabella riassuntiva con le tensioni calcolate in ogni nodo per ogni combinazione di carico e l'indicazione se tali tensioni verificano o meno la sezione



PROVA DI CARICO 1 →



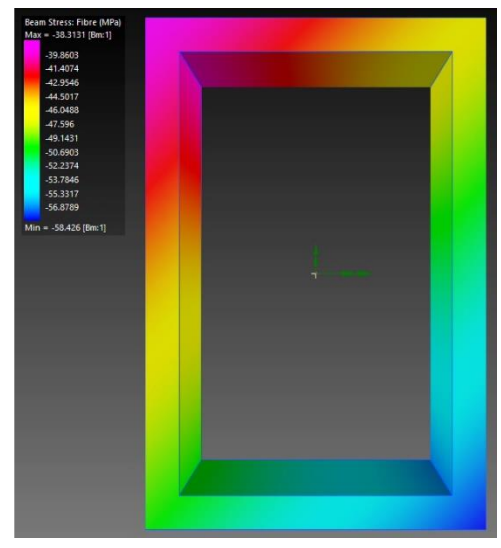
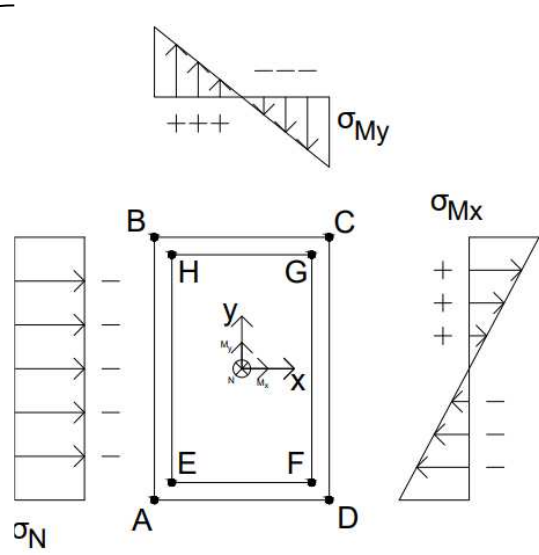
PROVA DI CARICO 2 →



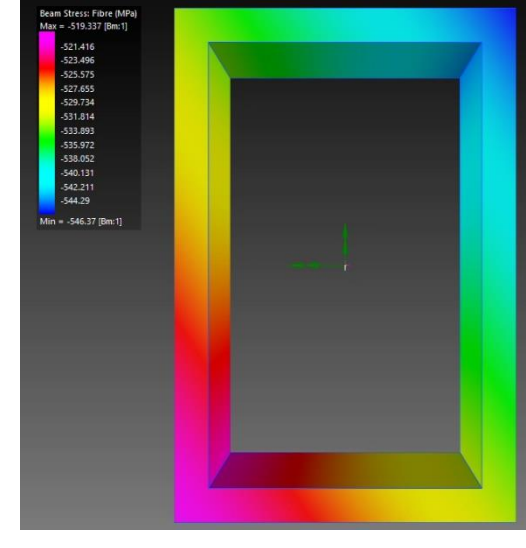
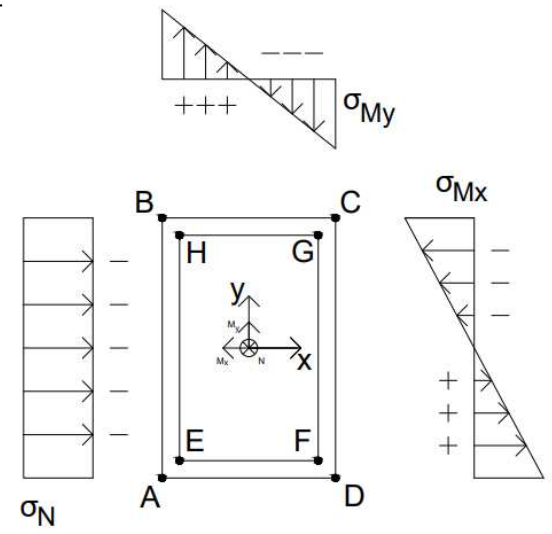
PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-20; -12,19)	-14,06	VERIFICATA	-9,45	VERIFICATA
(-20; -6,19)	-8,75	VERIFICATA	-10,15	VERIFICATA
(-3; -6,19)	8,97	VERIFICATA	-9,53	VERIFICATA
(-3; 27,81)	39,02	VERIFICATA	-13,48	VERIFICATA
(3; 27,81)	45,28	VERIFICATA	-13,26	VERIFICATA
(3; -6,19)	15,22	VERIFICATA	-9,30	VERIFICATA
(20; -6,19)	32,95	VERIFICATA	-8,68	VERIFICATA
(20; -12,19)	27,64	VERIFICATA	-7,98	VERIFICATA

Confrontando l'andamento a farfalla teorico e il risultato numerico di Straus7 con i valori in tabella ottenuti con il codice si nota la bontà dei risultati

PROVA DI CARICO 1 →



PROVA DI CARICO 2 →

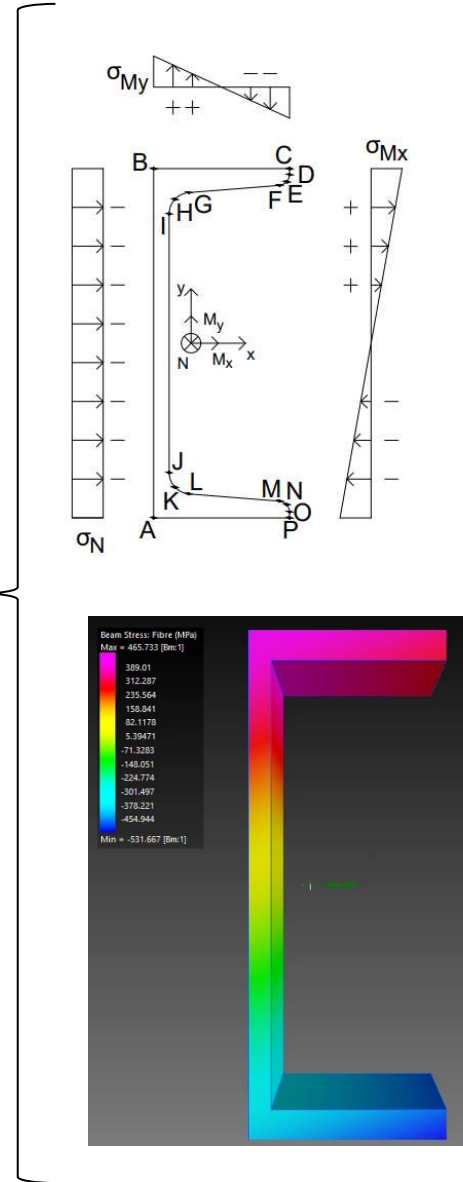


PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-10; -15)	-50,23	VERIFICATA	-519,34	NON VERIFICATA
(-10; 15)	-38,31	VERIFICATA	-533,05	NON VERIFICATA
(10; 15)	-46,51	VERIFICATA	-546,37	NON VERIFICATA
(10; -15)	-58,43	VERIFICATA	-532,66	NON VERIFICATA
(-10; -15)	-50,23	VERIFICATA	-519,34	NON VERIFICATA
(-8; -13)	-50,25	VERIFICATA	-521,58	NON VERIFICATA
(8; -13)	-56,81	VERIFICATA	-532,24	NON VERIFICATA
(8; 13)	-46,49	VERIFICATA	-544,12	NON VERIFICATA
(-8; 13)	-39,93	VERIFICATA	-533,46	NON VERIFICATA
(-8; -13)	-50,25	VERIFICATA	-521,58	NON VERIFICATA

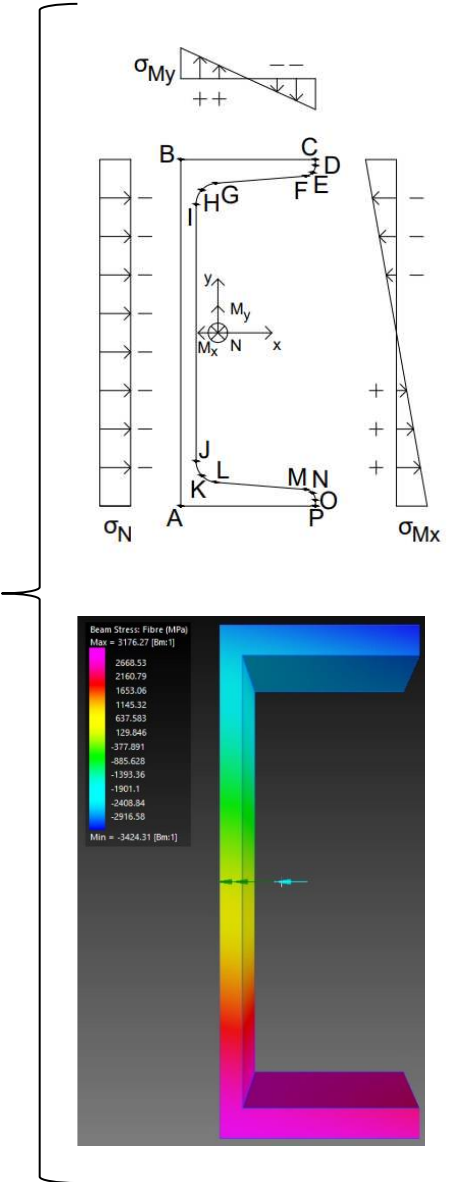
Alcune note:

- È un profilo scatolare, quindi «vuoto» all'interno: i punti del contorno esterno sono inseriti in senso orario mentre i punti del contorno interno in senso antiorario;
- Si cambia il verso di «rotazione», per la scrittura dei punti del rettangolo interno, dato che, inserendo i punti in senso antiorario, si invertono i segni di area e momenti del primo e secondo ordine; ciò permette di sottrarre ai parametri geometrici calcolati sul rettangolo «esterno» i parametri geometrici del rettangolo «interno»;
- Si può utilizzare tale stratagemma solamente perché i due rettangoli condividono lo stesso sistema principale d'inerzia;
- Inoltre, il profilo esterno è chiuso riscrivendo il punto iniziale (il punto [-10; -15]);
- Anche il profilo interno è chiuso ripetendo il punto iniziale (il punto [-8; -13]).

PROVA DI CARICO 1

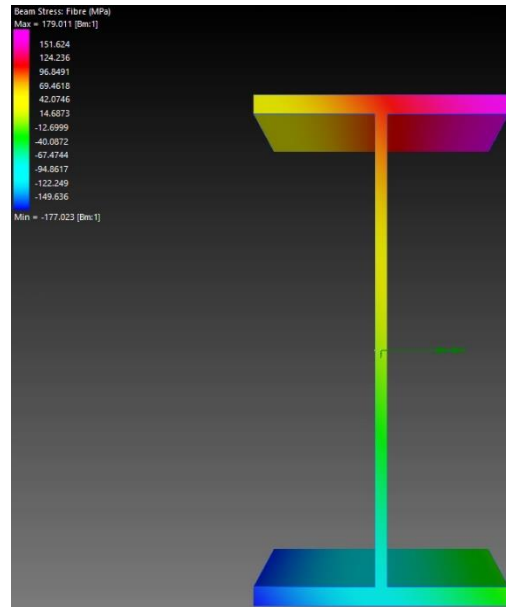
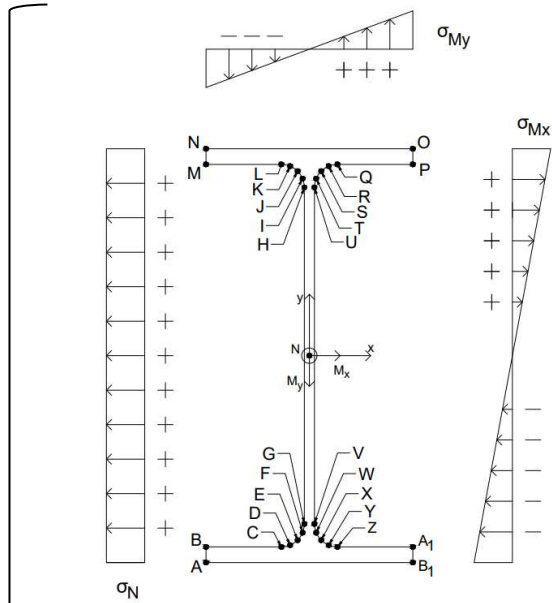


PROVA DI CARICO 2

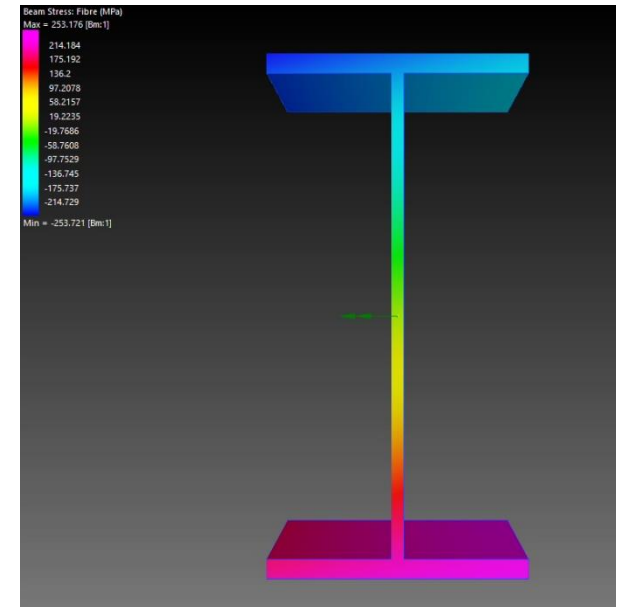
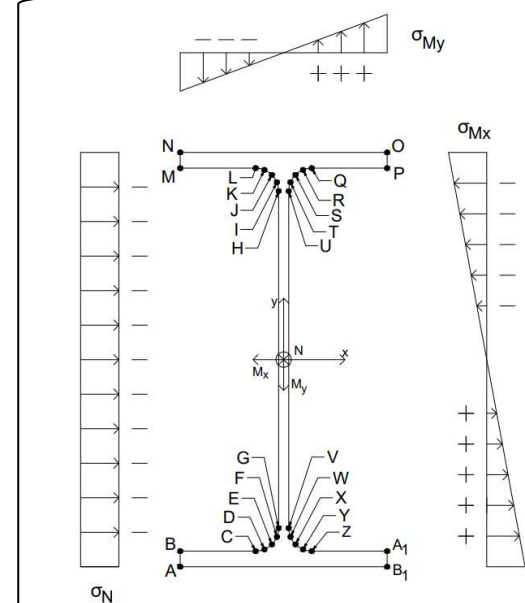


PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-19,17; -90)	-398,18	NON VERIFICATA	3164,15	NON VERIFICATA
(-19,17; 90)	463,81	NON VERIFICATA	-2871,89	NON VERIFICATA
(50,83; 90)	331,43	VERIFICATA	-3412,59	NON VERIFICATA
(50,83; 86,88)	316,48	VERIFICATA	-3307,89	NON VERIFICATA
(49,37; 83,15)	301,37	VERIFICATA	-3171,51	NON VERIFICATA
(45,77; 81,40)	299,80	VERIFICATA	-3084,94	NON VERIFICATA
(1,05; 77,65)	370,40	NON VERIFICATA	-2597,73	NON VERIFICATA
(-8,25; 74,15)	367,25	NON VERIFICATA	-2424,59	NON VERIFICATA
(-11,17; 66,68)	337,03	VERIFICATA	-2151,84	NON VERIFICATA
(-11,17; -66,68)	-301,65	VERIFICATA	2320,52	NON VERIFICATA
(-8,25; -74,15)	-342,90	NON VERIFICATA	2548,19	NON VERIFICATA
(-1,05; -77,65)	-373,31	NON VERIFICATA	2610,02	NON VERIFICATA
(-8,25; -74,15)	-342,90	NON VERIFICATA	2548,19	NON VERIFICATA
(-1,05; -77,65)	-373,31	NON VERIFICATA	2610,02	NON VERIFICATA
(45,77; -81,40)	-479,78	NON VERIFICATA	2373,99	NON VERIFICATA
(49,37; -83,15)	-494,98	NON VERIFICATA	2404,9	NON VERIFICATA
(50,83; -86,88)	-515,60	NON VERIFICATA	2518,74	NON VERIFICATA
(50,83; -90)	-530,56	NON VERIFICATA	2623,45	NON VERIFICATA

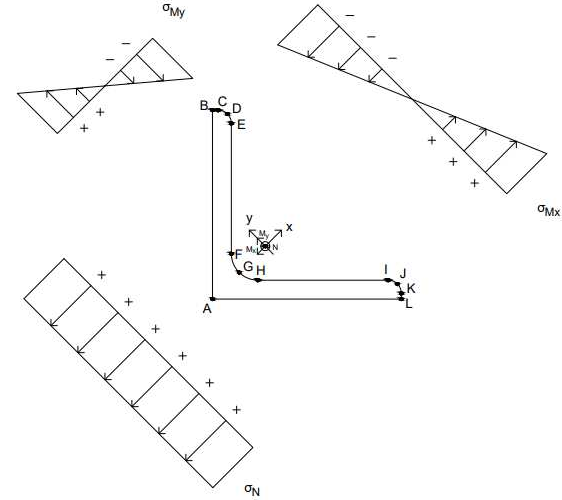
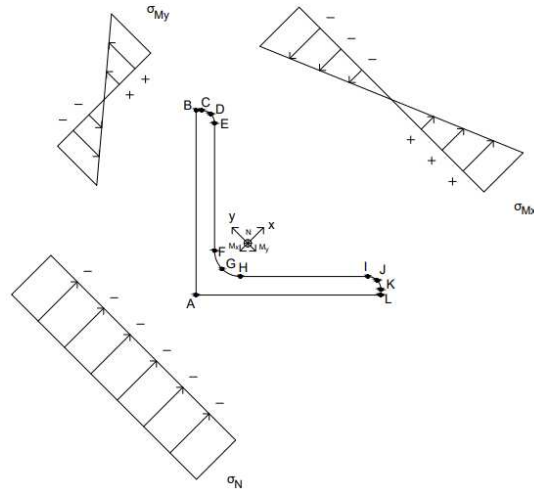
PROVA DI CARICO 1 →



PROVA DI CARICO 2 →

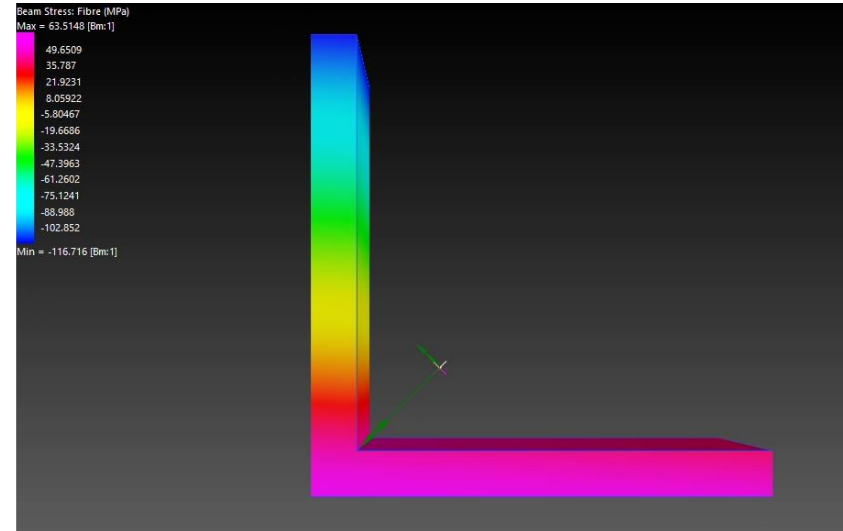
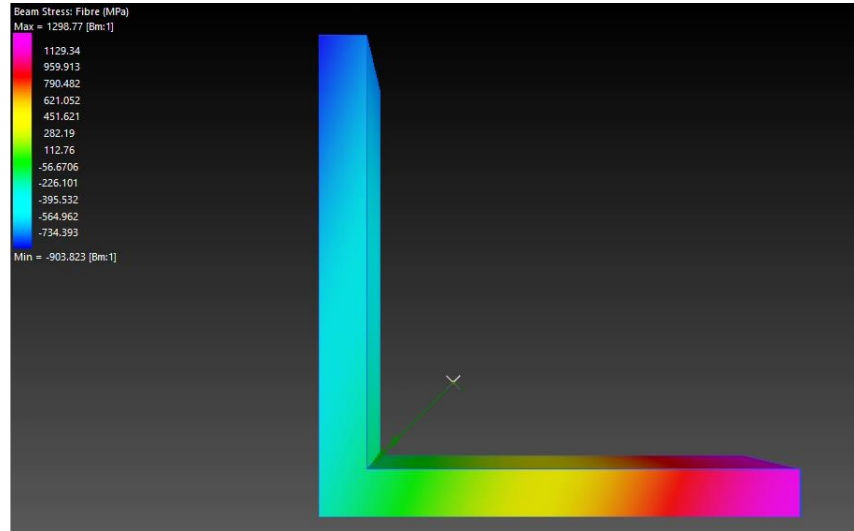


PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-67,5; -135)	-176,55	VERIFICATA	194,35	VERIFICATA
(-67,5; -124,8)	-168,63	VERIFICATA	177,46	VERIFICATA
(-18,3; -124,8)	-115,57	VERIFICATA	198,55	VERIFICATA
(-12,56; -123,66)	-108,50	VERIFICATA	199,12	VERIFICATA
(-7,69; -120,41)	-100,73	VERIFICATA	195,82	VERIFICATA
(-4,44; -115,54)	-93,44	VERIFICATA	189,15	VERIFICATA
(-3,3; -109,8)	-87,76	VERIFICATA	180,14	VERIFICATA
(-3,3; 109,8)	82,62	VERIFICATA	-183,51	VERIFICATA
(-4,44; 115,54)	85,84	VERIFICATA	-193,50	VERIFICATA
(-7,69; 120,41)	86,11	VERIFICATA	-202,95	VERIFICATA
(-12,56; 123,66)	83,39	VERIFICATA	-210,42	VERIFICATA
(-18,3; 124,8)	78,08	VERIFICATA	-214,77	VERIFICATA
(-67,5; 124,8)	25,02	VERIFICATA	-235,86	VERIFICATA
(-67,5; 135)	32,93	VERIFICATA	-252,75	VERIFICATA
(67,5; 135)	178,53	VERIFICATA	-194,90	VERIFICATA
(67,5; 124,8)	170,61	VERIFICATA	-178,01	VERIFICATA
(18,3; 124,8)	117,55	VERIFICATA	-199,09	VERIFICATA
(12,56; 123,66)	110,48	VERIFICATA	-199,66	VERIFICATA
(7,69; 120,41)	102,70	VERIFICATA	-196,36	VERIFICATA
(4,44; 115,54)	95,42	VERIFICATA	-189,70	VERIFICATA
(3,3; 109,8)	89,74	VERIFICATA	-180,68	VERIFICATA
(3,3; -109,8)	-80,64	VERIFICATA	182,96	VERIFICATA
(4,44; -115,54)	-83,86	VERIFICATA	192,96	VERIFICATA
(7,69; -120,41)	-84,13	VERIFICATA	202,41	VERIFICATA
(12,56; -123,66)	-81,41	VERIFICATA	209,88	VERIFICATA
(18,3; -124,8)	-76,10	VERIFICATA	214,23	VERIFICATA
(67,5; -124,8)	-23,04	VERIFICATA	235,31	VERIFICATA
(67,5; -135)	-30,96	VERIFICATA	252,20	VERIFICATA



PROVA DI CARICO 1 →

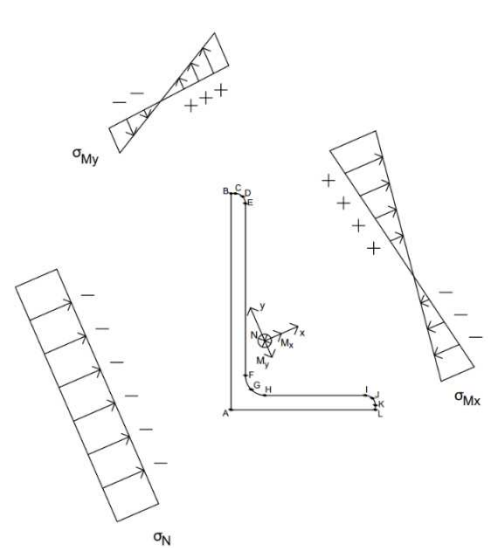
PROVA DI CARICO 2 →



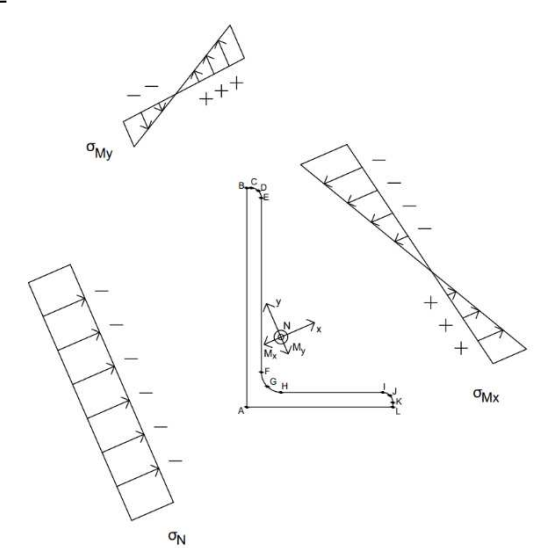
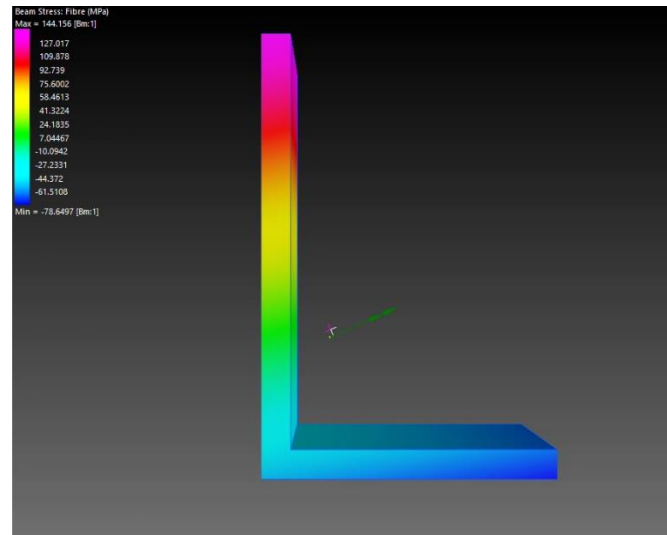
PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-19,71; 0)	-287,07	VERIFICATA	63,57	VERIFICATA
(15,64; 35,35)	-914,69	NON VERIFICATA	-117,44	VERIFICATA
(16,71; 34,3)	-866,57	NON VERIFICATA	-117,69	VERIFICATA
(17,73; 31,82)	-774,40	NON VERIFICATA	-114,39	VERIFICATA
(16,71; 29,34)	-710,49	NON VERIFICATA	-105,60	VERIFICATA
(-7,69; 4,95)	-277,48	VERIFICATA	19,30	VERIFICATA
(-9,74; 0)	-149,67	VERIFICATA	36,88	VERIFICATA
(-7,69; -4,95)	34,65	VERIFICATA	43,49	VERIFICATA
(16,71; -29,34)	1140,01	NON VERIFICATA	37,80	VERIFICATA
(17,73; -31,82)	1232,17	NON VERIFICATA	41,18	VERIFICATA
(16,71; -34,3)	1296,09	NON VERIFICATA	49,89	VERIFICATA
(15,64; -35,35)	1314,89	NON VERIFICATA	55,32	VERIFICATA

Nello studio della sezione a L si possono notare i limiti del codice:

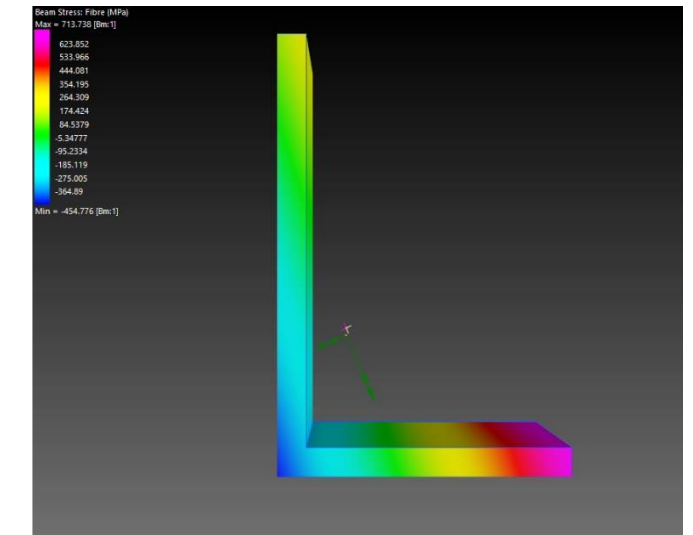
- Il codice stesso non permette il calcolo dei momenti d'inerzia rispetto agli assi principali con una nuvola di punti rispetto a un sistema di riferimento qualsiasi;
- Sarà compito dell'utente finale, oltre che a traslare i punti, anche a ruotarli utilizzando la matrice di rotazione;
- L'angolo di rotazione è noto: essendo una sezione a L ad ali uguali, l'angolo di rotazione è pari a 45°;
- In alternativa, l'utente può solo traslare i punti e poi lanciare il programma: otterrà in output i momenti d'inerzia rispetto agli assi non ruotati e il momento d'inerzia centrifugo;
- Diagonalizzando il tensore d'inerzia che ne deriva si può giungere ai momenti d'inerzia rispetto agli assi principali.



PROVA DI CARICO 1 →



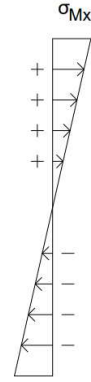
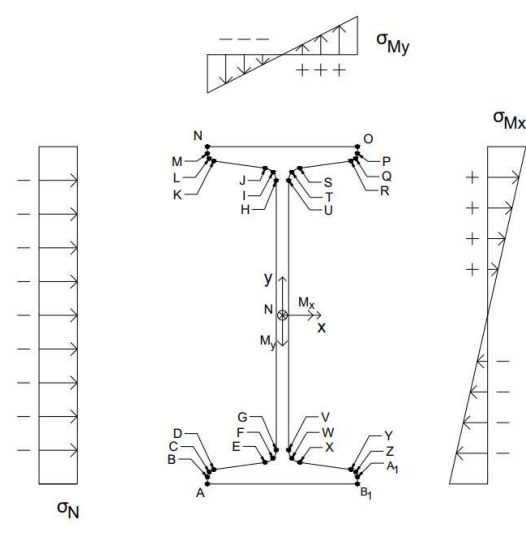
PROVA DI CARICO 2 →



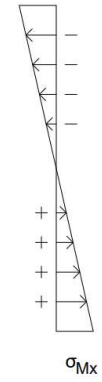
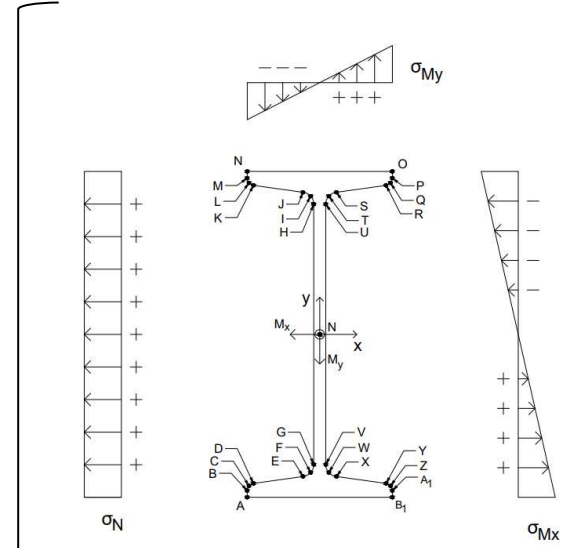
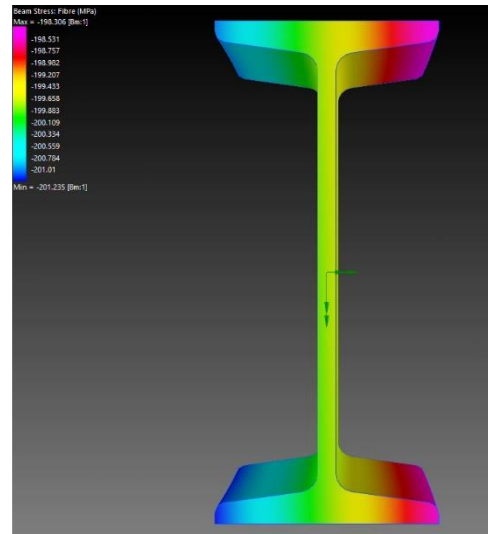
PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-32,4; -27,69)	-61,53	VERIFICATA	-443,83	NON VERIFICATA
(15,38; 82,39)	137,87	VERIFICATA	130,78	VERIFICATA
(17,67; 81,39)	137,09	VERIFICATA	166,27	VERIFICATA
(20,6; 78,37)	133,23	VERIFICATA	213,89	VERIFICATA
(20,53; 74,16)	126,27	VERIFICATA	218,18	VERIFICATA
(-17,5; -13,44)	-32,41	VERIFICATA	-239,19	VERIFICATA
(-17,64; -21,86)	-46,33	VERIFICATA	-239,62	VERIFICATA
(-12,06; -27,79)	-53,97	VERIFICATA	-139,70	VERIFICATA
(39,12; -50,01)	-71,14	VERIFICATA	653,39	NON VERIFICATA
(42,05; -53,04)	-75,02	VERIFICATA	701,02	NON VERIFICATA
(41,98; -57,25)	-81,98	VERIFICATA	705,31	NON VERIFICATA
(40,98; -59,54)	-86,13	VERIFICATA	693,26	NON VERIFICATA

La sezione a L in esame è ad ali disuguali, quindi:

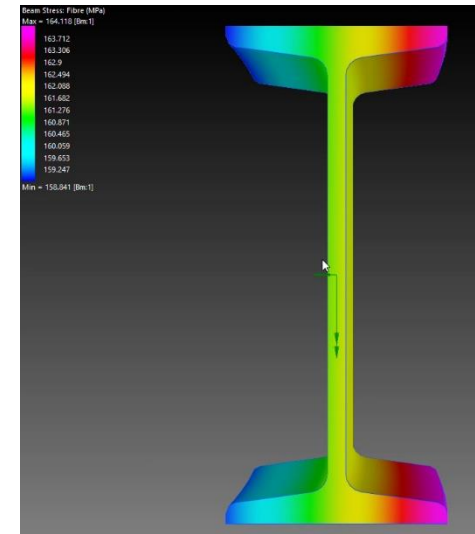
- Presenta le stesse problematiche inerenti la sezione a L ad ali uguali;
- Inoltre, l'angolo di rotazione del sistema principale d'inerzia non è noto ma deve essere calcolato con il rischio di perdere accuratezza
- In alternativa si può, come con la sezione a L ad ali uguali, traslare solamente i punti e ottenere con l'output del programma un tensore d'inerzia da diagonalizzare



PROVA DI CARICO 1 →



PROVA DI CARICO 2 →



PUNTI	σ_z [MPa] PROVA 1	VERIFICA PROVA 1	σ_z [MPa] PROVA 2	VERIFICA PROVA 2
(-49; -110)	-200,66	VERIFICATA	158,53	VERIFICATA
(-49; -105,49)	-200,66	VERIFICATA	158,53	VERIFICATA
(-47,8; -102,27)	-200,62	VERIFICATA	158,59	VERIFICATA
(-44,78; -100,64)	-200,54	VERIFICATA	158,75	VERIFICATA
(-11,33; -95,96)	-199,59	VERIFICATA	160,49	VERIFICATA
(-6,14; -93,33)	-199,44	VERIFICATA	160,76	VERIFICATA
(-4,05; -87,90)	-199,38	VERIFICATA	160,87	VERIFICATA
(-4,05; 87,90)	-199,23	VERIFICATA	160,73	VERIFICATA
(-6,14; 93,33)	-199,28	VERIFICATA	160,61	VERIFICATA
(-11,33; 95,96)	-199,43	VERIFICATA	160,34	VERIFICATA
(-44,78; 100,64)	-200,36	VERIFICATA	158,58	VERIFICATA
(-47,80; 102,27)	-200,45	VERIFICATA	158,42	VERIFICATA
(-49; 105,49)	-200,48	VERIFICATA	158,36	VERIFICATA
(-49; 110)	-200,48	VERIFICATA	158,35	VERIFICATA
(49; 110)	-197,72	VERIFICATA	163,49	VERIFICATA
(49; 105,49)	-197,72	VERIFICATA	163,49	VERIFICATA
(47,80; 102,27)	-197,76	VERIFICATA	163,43	VERIFICATA
(44,78; 100,64)	-197,84	VERIFICATA	163,27	VERIFICATA
(11,33; 95,96)	-198,79	VERIFICATA	161,52	VERIFICATA
(6,14; 93,33)	-198,94	VERIFICATA	161,26	VERIFICATA
(4,05; 87,90)	-199,00	VERIFICATA	161,15	VERIFICATA
(4,05; -87,90)	-199,15	VERIFICATA	161,29	VERIFICATA
(6,14; -93,33)	-199,10	VERIFICATA	161,41	VERIFICATA
(11,33; -95,96)	-198,95	VERIFICATA	161,68	VERIFICATA
(44,78; -100,64)	-198,01	VERIFICATA	163,44	VERIFICATA
(47,80; -102,27)	-197,93	VERIFICATA	163,59	VERIFICATA
(49; -105,49)	-197,90	VERIFICATA	163,66	VERIFICATA
(49; -110)	-197,90	VERIFICATA	163,66	VERIFICATA

La verifica di sezioni mediante codice OOP si è potuta realizzare nei seguenti passaggi:

- Individuazione dei parametri di interesse da utilizzare per la verifica, ovvero le tensioni ortogonali alla sezione;
- Identificazione dei conseguenti parametri geometrici necessari, ovvero momenti statici, momenti d'inerzia, area;
- Trasposizione del modello fisico bidimensionale della sezione in un modello matematico da utilizzare nel codice, ovvero il polinomio continuo a tratti definito grazie ai nodi della sezione (i suoi vertici);
- Elaborazione di un metodo che acquisisca i nodi e gli altri parametri d'interesse inseriti dall'utente in un file di testo;
- Ricerca e implementazione di un algoritmo che permetta il calcolo dei suddetti parametri geometrici tramite iterazioni;
- Applicazione della teoria della trave di De Saint-Venant, in particolare dell'equazione di Navier, per determinare le tensioni a cui è soggetta la trave in ogni nodo;
- Verifica, tramite il metodo delle tensioni ammissibili, dei nodi della trave;
- Sviluppo di un metodo di stampa dei risultati su file di testo, per essere facilmente fruibile dall'utente finale.

Sviluppi futuri

- Aggiunta di un metodo di calcolo delle tensioni tangenziali dovute a taglio e momento torcente;
- Calcolo dei momenti d'inerzia rispetto agli assi principali anche nel caso in cui i nodi non siano forniti in un sistema principale d'inerzia;
- Verifica di coerenza dei punti per poter limitare eventuali errori di inserimento da parte dell'utente.

Grazie alla programmazione orientata agli oggetti le future implementazioni potranno essere aggiunte agevolmente anche da un altro programmatore in quanto l'oggetto (la classe Sezione) è già stato definito e può essere richiamato; infatti, al suo interno sono presenti già gli attributi per poter aggiungere altre verifiche (ad esempio sono predisposte le forze e i momenti lungo i 3 assi principali).