

## La rigidità dell'elemento strutturale e le pareti.

Per un edificio antisismico **3** è il minimo numero di strutture piane sismo resistenti non convergenti in un unico punto, che è necessario prevedere.

Se sono pareti, dovendo da sole resistere a tutte le forze orizzontali che sono più forti ai piani alti, le sezioni a quota fondazioni saranno sollecitate da elevati momenti flettenti.  $M = \text{Forze sismiche globali in elevazione} \cdot \text{altezza da quota fondazioni}$ . Ora poiché lo sforzo normale è quasi=0 perché i carichi verticali li portano dei pilastri calcolati solo per carichi verticali centrati, l'eccentricità alla base, è notevole.

Così come occorre fare molta attenzione al collegamento degli impalcati alle pareti affinché sia ad esse trasferito tutto il sisma, allo stesso modo bisogna prevedere idonee strutture per trasferire i notevoli Momenti e Tagli dal piede delle pareti alle fondazioni e quindi al terreno.

Con i controventi isolati, di solito, le travi, sono incernierate.

Le travi sono molto alte perché occorre calcolarle con un momento in mezzaria pari a  $Q_{\text{verticale}} \cdot L^2/8$ , e sono anche molto deformabili perché si abbasseranno di  $5/384 \cdot Q \cdot L^4 / (E \cdot J)$ .

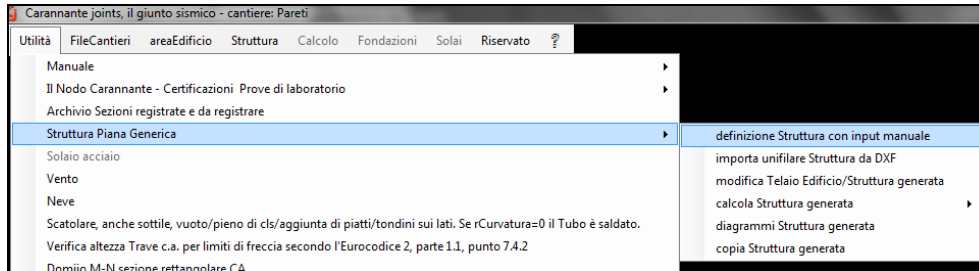
Se le travi, invece che incernierate le costruiamo incastrate, otteniamo un Telaio Piano: una struttura sismo resistente autonoma che resiste anche a Forze Orizzontali. Le travi possono essere proporzionate con un momento per carichi verticali pari a  $Q \cdot L^2/24$  (3 volte più piccolo) e non hanno problemi di deformabilità verticale perché l'abbassamento è pari a  $1/384 \cdot Q \cdot L^4 / (E \cdot J)$ ; 5 volte più piccolo. Se poi l'incastro è iper-rigido; cioè vincolato attraverso un tratto più rigido come lo è il NodoCarante, allora questi vantaggi sono ancora più accentuati perché la luce della trave si riduce; e la luce è al quadrato nel primo caso ed alla quarta nel secondo caso. In quest'ultimo caso, in linea con la gerarchia delle resistenze che vuole pilastri forti e travi deboli, i pilastri dovranno essere per forza più forti perché devono fungere da incastro per le travi che essendo incastrate sono più esili.

Il Telaio può anche essere accoppiato e collaborare con i controventi isolati. Ogni struttura sismo resistente assorbirà una aliquota di sisma proporzionale alla propria **Rigidità=Forza necessaria per ottenere spostamento unitario**.

**Vedremo che la struttura piana più rigida, assorbe più sisma.**

Utilizziamo il software per chiarirci un po' le idee sulla **Rigidezza**, su questo fenomeno che interviene negli spostamenti degli impalcati sotto sisma e su come funziona il TelSpa il solutore di calcolo del prof.Gherzi.

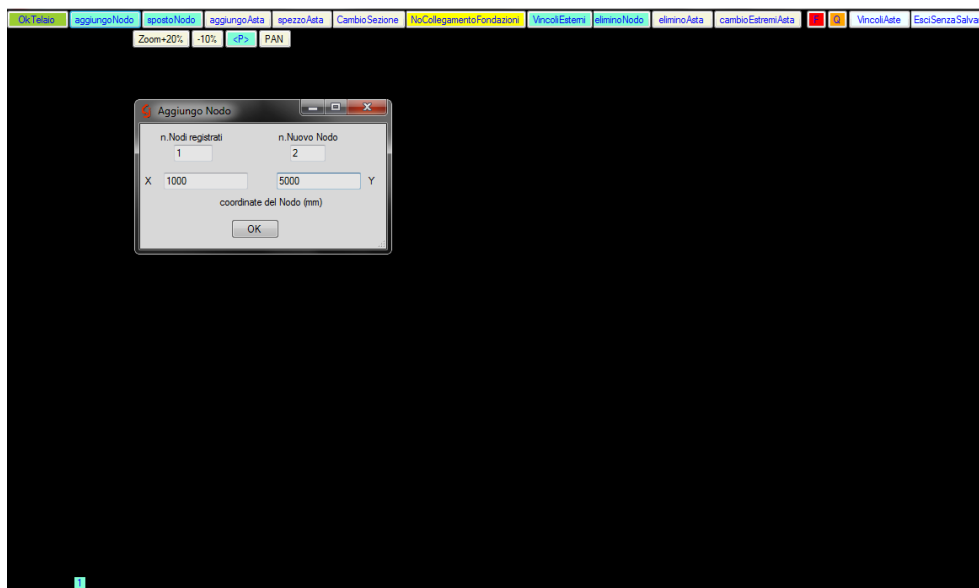
Dal menù *Utilità* → *Struttura Piana Generica*



creiamo una struttura con input manuale.

Creiamo una mensola verticale alta 5000mm.

Dal bottone **aggiungoNodo** immettiamo il nodo1 di coordinate 1000,0 e il nodo2 di coordinate 1000,5000 mm.

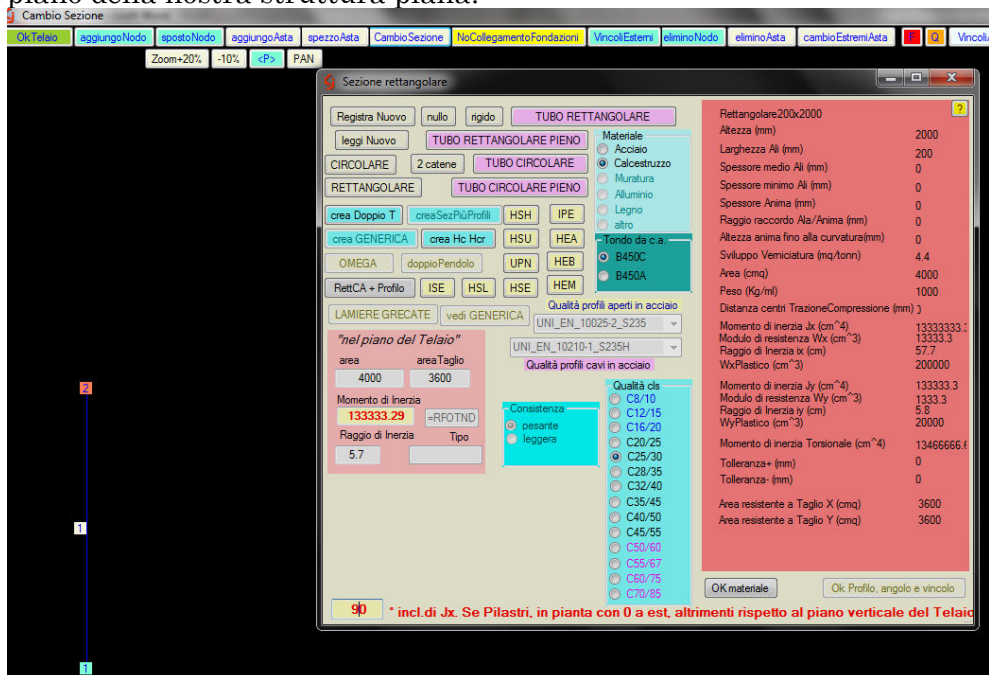


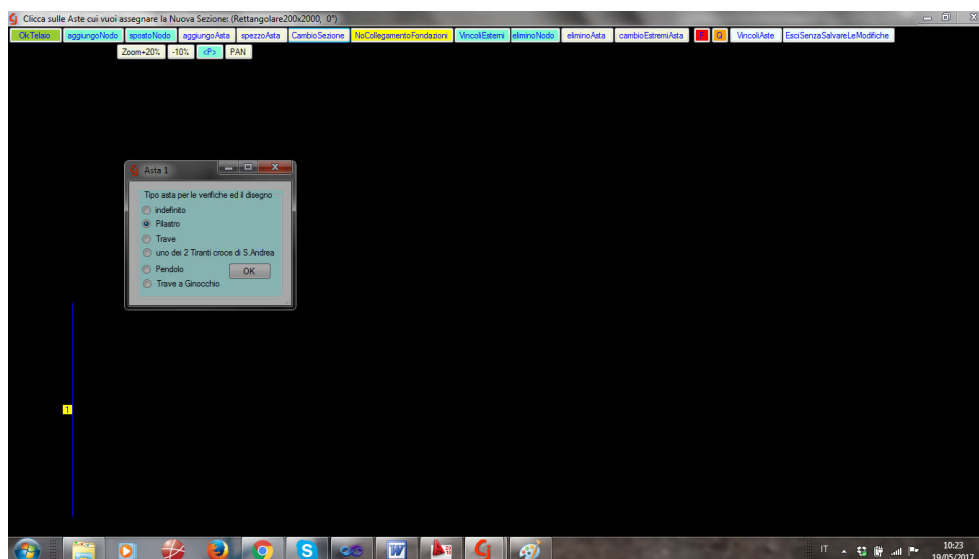
Dopo dal bottone **aggiungoAsta**, cliccando sul primo estremo e poi sul secondo estremo, dopo la conferma, è aggiunta l'asta n.1 definita dalle coordinate di questi 2 estremi.



Dopo dal bottone **cambioSezione** scegliamo la sezione rettangolare di base 200 e altezza 2000 mm. di c.a. di qualità C25/30 con un angolo del lato Rigido di 0° (ci sta bene che la base è 200 e l'altezza è 2000; con un angolo di 90°, la base sarebbe stata 2000 e l'altezza 200) e la assegniamo all'asta n.1 cliccando sul n.1 di colore bianco al centro dell'asta che rappresenta a video la nostra asta.

In questo modo diciamo a Cj che la sezione di questa asta è *rettangolare200x2000mm* in c.a. di qualità *C25/30* ed ha il lato rigido della sua sezione, la dimensione dei 2000, coincidente col video che è il piano della nostra struttura piana.

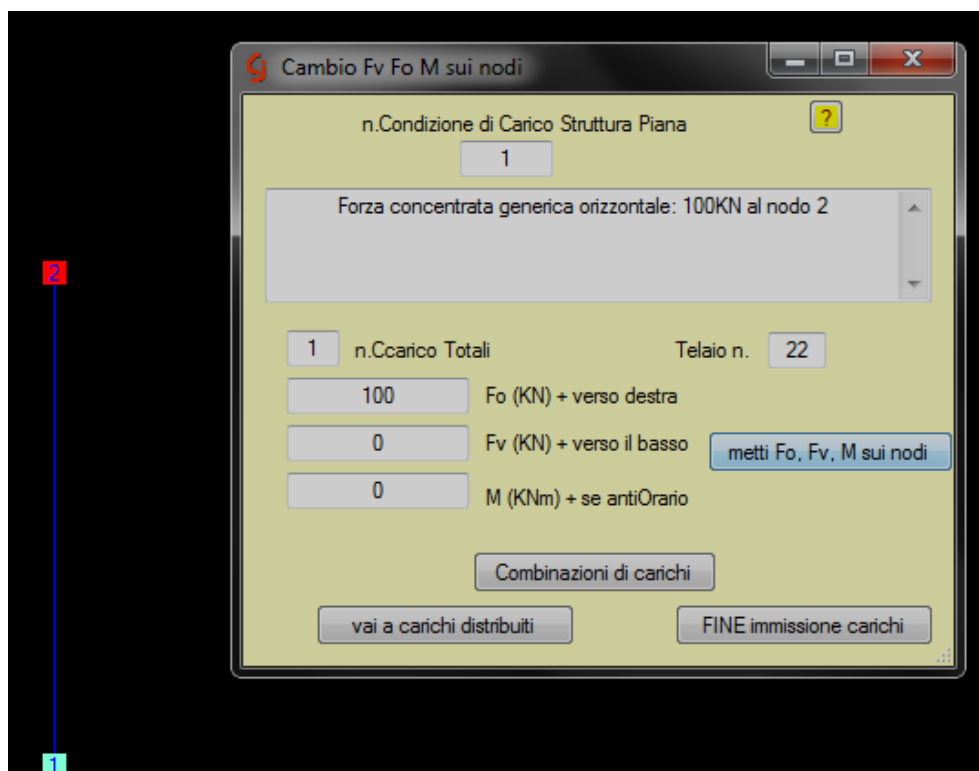




E' una parete perché ha  $h > 4 \cdot b$ . Dobbiamo indicare che è un pilastro. E' necessario per le verifiche automatiche. (In questo caso non servirebbe).

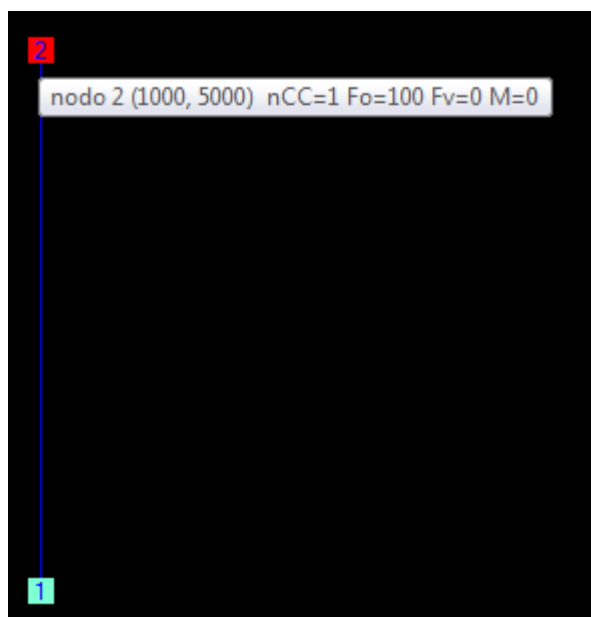


Ora dal bottone **F** la sollecitiamo in sommità con una Forza Orizzontale generica di 100 KN nel piano, nella direzione dei 2000mm.



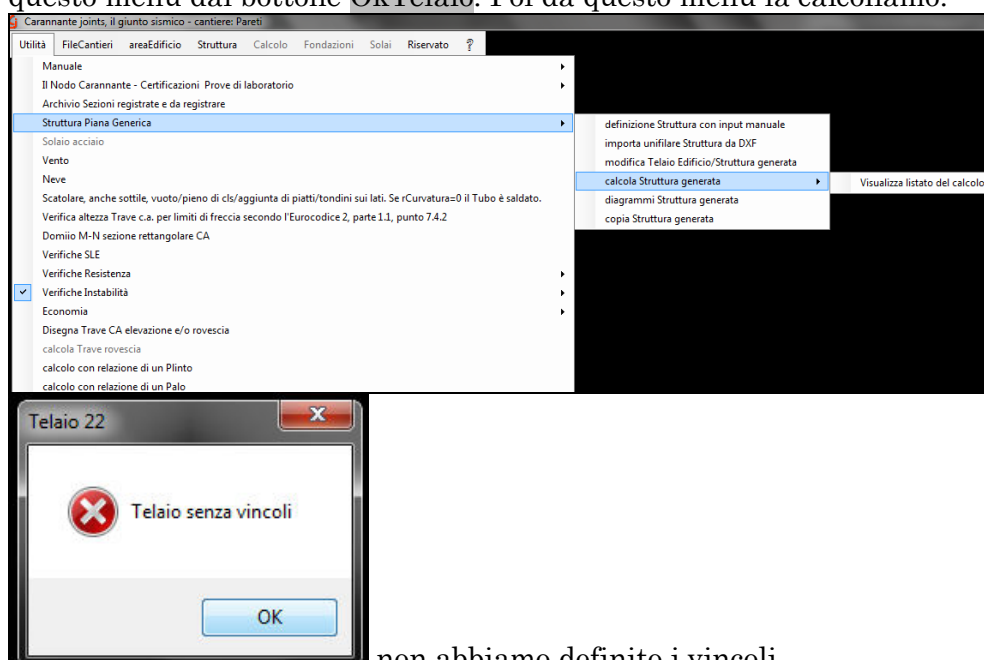
Cliccando sul bottone **metti Fo, Fv, M sui nodi**, le forze concentrate da applicare vengono caricate in memoria.

Cliccando poi sui nodi interessati vengono applicate alla struttura alla condizione di carico in evidenza.



sfiorando col mouse un nodo, il tooltip ci indica i dati in memoria.

Salviamo la struttura che abbiamo creato o modificato dopo aver chiuso questo menù dal bottone **OkTelaio**. Poi da questo menù la calcoliamo.



non abbiamo definito i vincoli.

Dopo il calcolo osserviamo gli spostamenti. La calcoliamo come struttura piana generica e, dal listato del TelGen sempre del prof.Gherzi vediamo

**SPOSTAMENTI E ROTAZIONI DEI NODI**

nodo	vx (mm)	vy (mm)	rotaz.x1000
1	0.000	0.000	0.000
2	<b>0.993</b>	0.000	-0.298

oppure guardando i diagrammi degli spostamenti restituiti da Cj nel DXF leggiamo gli spostamenti: orizzontali, verticali.



Lungo i **2000mm** si sposta di **0.993 mm**.

Essendo il calcolo lineare, con una semplice proporzione ne calcoliamo la Rigidità.

In questa direzione la parete ha una Rigidità = Forza per ottenere uno spostamento unitario pari a  $100/0.993 = \mathbf{100.71 \text{ KN/mm}}$

Con una forza di **100.71 KN/mm** che sollecita la sommità della mensola nella direzione dei 2000mm, la mensola si sposta di 1 mm.

Ripetiamo lo stesso ragionamento. Generando un'altra struttura piana o cambiando sezione alla struttura precedente e assegnando la sezione rettangolare di 200x2000mm di c.a. di qualità C25/30 questa volta col lato Flessibile, ruotata di 90°, nella direzione dei **200**. Effettuando il calcolo sempre con una forza di 100KN in sommità, si ottiene:

**SPOSTAMENTI E ROTAZIONI DEI NODI**

nodo	vx (mm)	vy (mm)	rotaz.x1000
1	0.000	0.000	0.000
2	<b>99.283</b>	0.000	-29.785

E dal DXF



si sposta di 99.283mm.

In questa direzione la parete ha una Rigidità = Forza per ottenere uno spostamento unitario pari a  $100/99.283 = 1.007$  KN/mm.

*La Rigidità nelle 2 direzioni principali della parete; Forze per ottenere in entrambi i casi, lo spostamento unitario di 1 mm. della sommità della parete.*

*Lungo il lato Rigido occorre una forza di 100.71KN e lungo il lato Flessibile una forza di 1.007KN.*

Come si vede, è lecito trascurare la resistenza della parete nella direzione del suo spessore: rigidità=1.007 KN/mm contro i 100.71 KN/mm nella direzione del lato Rigido; il calcolo più o meno avrà una approssimazione dell'1%.

Vediamo ora come si comporta la parete più lunga : 200x3000mm che vogliamo mettere in basso in direzione X.

Lungo i 200mm, al lato Flessibile,

#### **SPOSTAMENTI E ROTAZIONI DEI NODI**

nodo	vx (mm)	vy (mm)	rotaz.x1000
1	0.000	0.000	0.000
2	<b>66.188</b>	0.000	-19.857

si sposta di 66.188mm. ed ha una Rigidità= $100/66.188 = 1.51$  KN/mm.

Lungo i 3000mm, al lato Rigido,

#### **SPOSTAMENTI E ROTAZIONI DEI NODI**

nodo	vx (mm)	vy (mm)	rotaz.x1000
1	0.000	0.000	0.000
2	<b>0.294</b>	0.000	-0.088

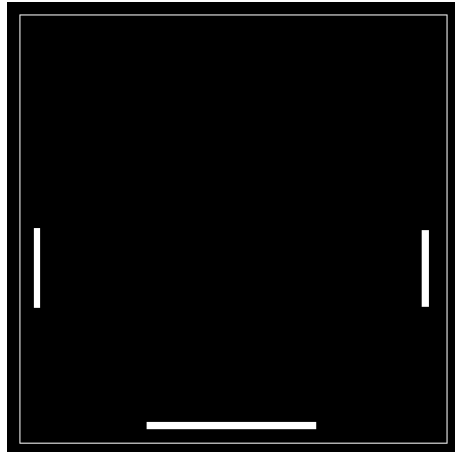
si sposta di 0.294mm. ed ha una Rigidità= $100/0.294 = 340.14$  KN/mm.

Trascurando la rigidità al lato Flessibile si ha una approssimazione dello 0.44%. Ancora più piccola.

Chiariteci le idee sulla rigidità, ora vogliamo calcolare quest'edificio sollecitato solo dal sisma agente prima in direzione Y e poi in direzione X. Un unico impalcato da 10x10m.

*Questo potrebbe essere il calcolo di un adeguamento sismico in cui vogliamo affidare tutto il sisma alle pareti non fidandoci della struttura preesistente.*





Ipotizzando che le 2 pareti Y siano 200x2000 e che siano ubicate in posizione *perfettamente simmetrica* rispetto al baricentro G dell'impalcato e che la parete X di 200x3000mm abbia il suo centro sull'asse di simmetria verticale.

Poiché la struttura in direzione Y è simmetrica ed è caricata con una sola forza applicata al centro dell'impalcato coincidente con G, in direzione Y, la parete parallela a X, non deve lavorare.

Vogliamo che ci debba essere solo traslazione lungo Y quando il sisma agisce in direzione Y.

Andiamo a controllare questa cosa per vedere se il solutore è attendibile.

Inoltre vogliamo conoscere il valore delle forze orizzontali che devono sollecitare le pareti in testa, nel piano dell'impalcato, per far spostare l'impalcato stesso di 4 mm in direzione Y.

Poiché abbiamo le rigidezze= Forza x far spostare di 1 mm le pareti, e, poiché il calcolo è elastico, basta moltiplicare la Rigidezza x 4 per far spostare la sommità delle 3 pareti, come l'impalcato, di 4 mm.

Le 2 pareti Y saranno sollecitate entrambe da una Forza Y, sul lato Rigido a quota impalcato pari a  $=100.71 * 4 = 402.84$  KN, mentre la parete X, sul lato Flessibile è sollecitata da una Forza Y =  $1.51 * 4 = 6.04$  KN.

Affinché ciò accada, l'impalcato deve essere sollecitato da una Forza Sismica Y complessiva pari a  $402.84 * 2$  pareti Y + 6.04 la Fy che

sollecita la parete X sul lato Flessibile=811.81KN Forza Sismica Totale che deve agire in direzione Y.

Se applichiamo nel baricentro dell'impalcato una  $F_y=811.81\text{KN}$  complanare all'impalcato e agente in direzione Y, l'impalcato si deve spostare di 4mm in direzione Y senza ruotare.

Vogliamo vedere questa cosa col software per chiarirci le idee e per controllare se il software è affidabile.

Eseguiamo il calcolo questa volta col TelSpa.

Il TelSpa ragiona per telai piani e in termini di rigidità; del singolo elemento rispetto al telaio piano e del singolo telaio piano all'interno del telaio spaziale.

Per utilizzare una parete, la dobbiamo utilizzare in modo simile a come si utilizza un telaio piano, per indicare simicamente in quale direzione deve essere presa in considerazione la sua resistenza la dobbiamo collegare almeno con un altro pilastro.

La direzione del telaio è la direzione della sismo resistenza della struttura piana verticale.

Non è consentito definire un pilastro singolarmente.

Il pilastro, a ogni piano, deve essere collegato con una o più travi per formare un telaio piano.

Tutti i telai piani poi formano l'intelaiatura spaziale.

Per aggirare questo inconveniente, onde affidare l'intera forza sismica solo a questi 3 controventi isolati, abbiamo introdotto il profilo *nullo*; un profilo avente area, inerzia e dimensioni uguali a 0, che sarà molto utile anche nella pratica tecnica.

Creiamo un cantiere dal nome Libro\_pareti con un unico impalcato.

Come dati geotecnici e sismici mettiamo quelli di default perché non ci interessano. La forza sismica calcolata automaticamente dai pesi propri, dagli scarichi dei solai e dei tompagni, non ci interessa, la sostituiamo immettendo dall'esterno 811.81KN che abbiamo calcolato sopra manualmente.

Per poter proseguire senza intoppi dobbiamo scegliere anche un generico solaio, anche se non ci serve. Senza un solaio Cj non ci farebbe definire la carpenteria.

Poi generiamo una carpenteria regolare con 2 campate secondo X di 5000 e una campata secondo Y di 5000. Eliminiamo il pilastro centrale in alto ed assegniamo come sezione dei pilastri quella delle pareti. 200x2000 le due pareti perimetrali parallele a Y e 2000x3000 quella in basso lungo l'asse X.

Ai 2 pilastri inferiori d'angolo 1 e 3 e a tutte le travi fittizie in elevazione per definire i telai piani, assegniamo il profilo *nullo*.

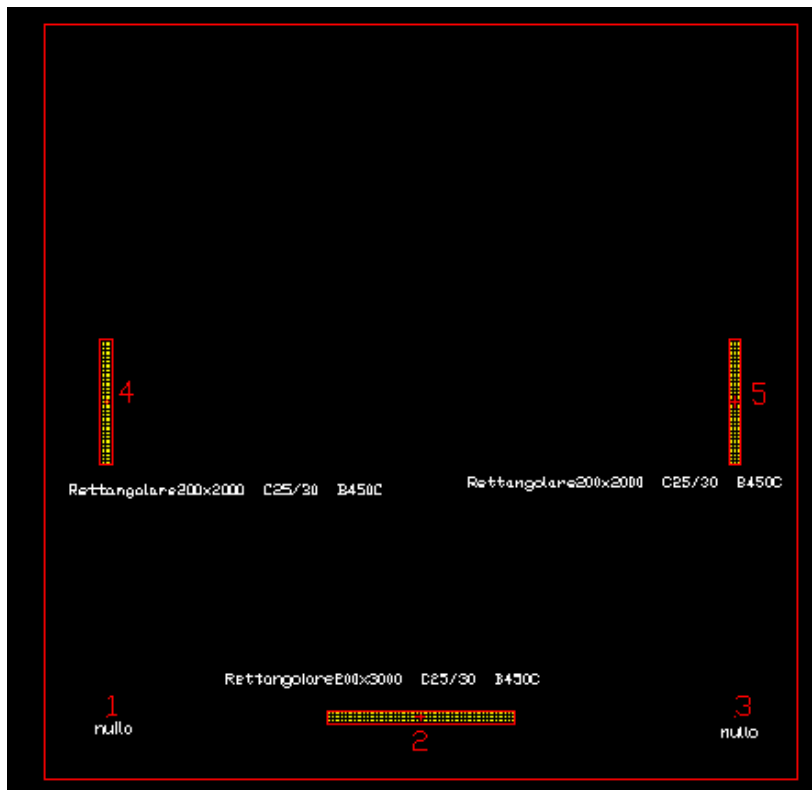
Definiamo il telaio 1 collegando i pilastri 1, 2 e 3. Il telaio 2 collegando i pilastri 1 e 4 e il telaio 3 collegando i pilastri 3 e 5.

Definiamo anche il contorno dell'impalcato assegnando un cornicione fittizio sul perimetro.

Nella carpenteria tipo che in ogni caso deve essere eseguita altrimenti Cj non ci consente di proseguire, clicchiamo sempre su OK senza immettere nessun solaio e nessun compagno.

Questo è il DXF che ci viene restituito.

Le travi definite col profilo *nullo* non vengono disegnate anche se nei dati e risultati del TelSpa ci sono.



Poiché il baricentro G dell'impalcato è calcolato automaticamente dai carichi sulle travi, carichi che in questo caso non ci sono, occorrerà aggiustare Forze sismiche = % dei carichi verticali che non ci sono e le coordinate di G, manualmente.  $x_G=5\text{m}$  e  $y_G= 5\text{m}$ .

Possiamo immettere questi dati dall'esterno avendo avuto l'accortezza di scegliere l'analisi statica quando abbiamo immesso i dati sismici. L'analisi modale ragiona in termini di spostamenti, Forze sismiche non ce ne sono e la relativa finestra non appare.

Immettiamo dall'esterno la  $F_{\text{sisma}}=811.81\text{KN}$  applicata nel baricentro dell'impalcato, il valore che abbiamo calcolato manualmente dalle rigidzze, e annulliamo le coppie di piano perché ci interessa solo l'effetto della forza sismica applicata nel baricentro dell'impalcato.

Forze sismiche					
	impalcato	Fx (KN)	Fy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
	1	811.81	811.81	0	0
*					

Abbiamo ipotizzato che i carichi verticali sono portati da altre strutture che non interferiscono con questo calcolo perché non le abbiamo definite. Vediamo i risultati del calcolo.

Come vediamo dal grafico che ci ha restituito il software, l'impalcato ha traslato senza ruotare in direzione Y di 4.03mm. Contorno rosso rispetto al contorno Bianco. Sul grafico, l'impalcato si è spostato di 403mm. Per apprezzare gli spostamenti li abbiamo moltiplicati x 100.



Perché si è spostato di 4.03mm e non di 4 mm ?

Semplicemente perché la parete X, non è entrata in gioco in direzione Y.

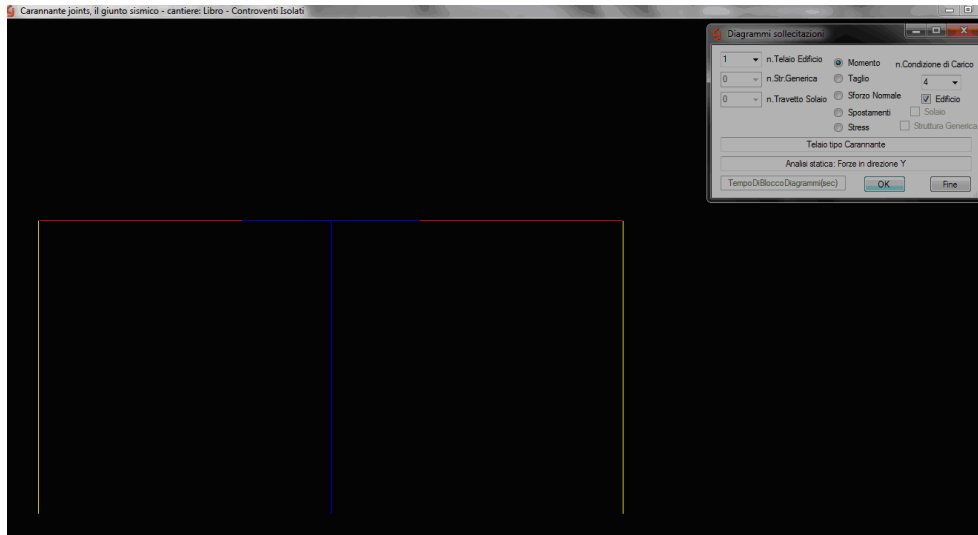
Questa parete non appartiene a nessun telaio in direzione Y, mentre nel calcolo manuale l'avevamo presa in considerazione.

Come previsto, il telaio 1 formato dalla parete di dimensioni 200x3000 e dai 2 pilastri *nullo* a destra e a sinistra, non è entrato in gioco in direzione Y; la direzione della sua sismoResistenza è solo secondo X.

Come si vede dal diagramma del Momento del Telaio n.1 parallelo a X visto in verticale, non ci sono momenti.

La parete X non ha reagito al sisma agente in direzione Y.

Per farlo entrare in gioco avremmo dovuto mettere un altro pilastro nullo sulla retta passante per il baricentro della parete e parallela a Y e collegarlo con un'altra trave *nullo* creando in questo modo un nuovo telaio piano reagente in direzione Y. Così come abbiamo fatto per le 2 pareti Y.



Notare che il ritto centrale in blu ha un tratto rigido a destra e a sinistra pari a metà dimensione della parete nella direzione del telaio; 150mm. mentre i ritti laterali *nulli* non hanno tratti rigidi perché hanno dimensione 0.

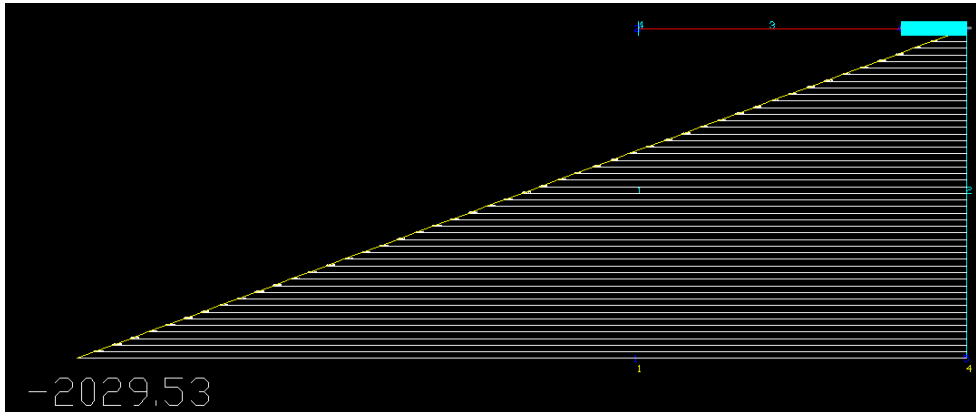
Il telai 2 e 3, anzi le 2 pareti 200x2000 si sono opposti da sole al sisma Y. Infatti il Momento flettente alla loro base è esattamente  $F_{sisma}=811.81$  applicata in G, diviso equamente fra le 2 pareti e moltiplicato per 5000=altezza della parete.  $M=2029.53$  KNm; così come restituito dal diagramma del momento di questi telai.

Notare che le aste nullo non partecipano alla resistenza del telaio piano, avendo rigidità nulla non assorbono momento.

La natura è clemente.

Ripartisce il sisma secondo la resistenza della singola membratura.

La struttura che è più forte piglia più sisma; all'interno del singolo telaio e come singolo telaio piano, all'interno dell'intera struttura spaziale .

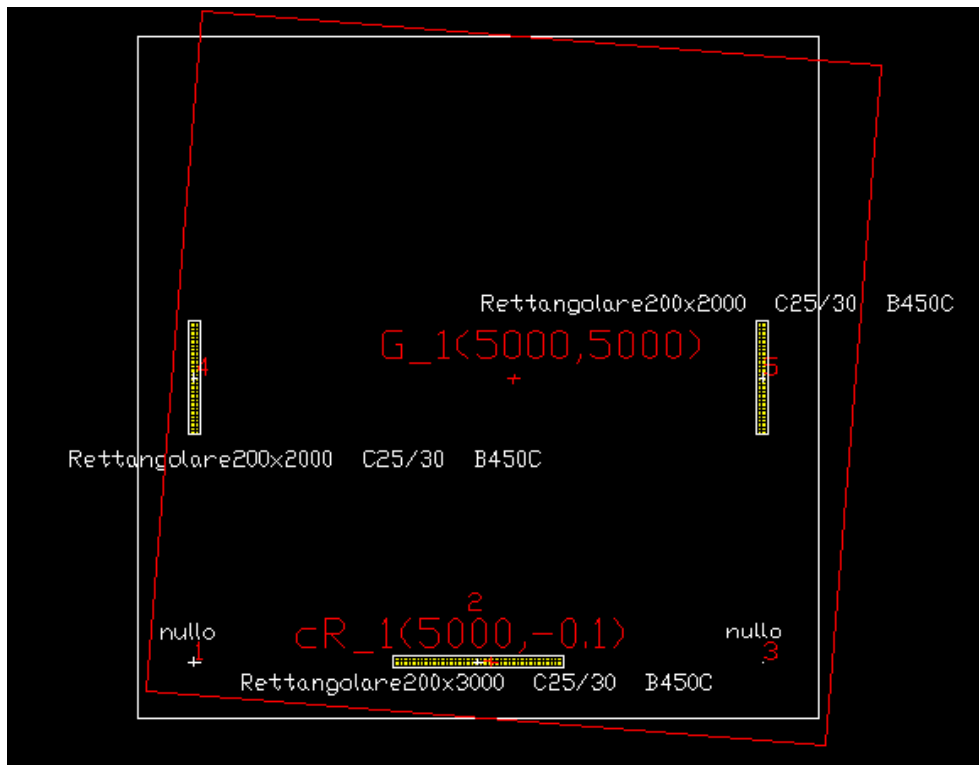


Allo stesso modo, quando la Forza agisce in direzione X, il sisma è assorbito per intero dal telaio 1.

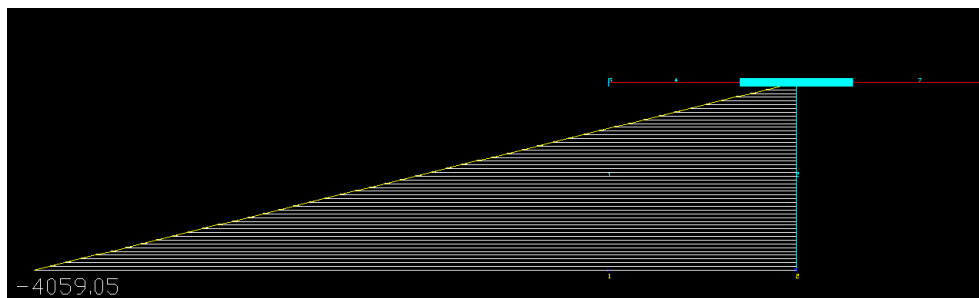
I telai 2 e 3 che hanno come ritti le 2 pareti Y col sisma in direzione X non sono interessati direttamente. Lo sono indirettamente perché contrastano la coppia che si viene a creare nell'impalcato =  $F_{\text{sisma}}$  applicata nel baricentro \* la distanza dal centro delle Rigidità  $cR$  dell'impalcato.

Poiché il baricentro  $G(5000,5000)$  e il centro delle rigidità  $cR(5000,0)$  non sono allineati alla direzione X, l'impalcato è soggetto anche alla coppia di trasporto  $F_{\text{sisma}} * \text{distanza } G-cR$ , per trasportare  $F_{\text{sisma}}$  da  $G$  a  $cR$ ; dal centro, in basso.

L'impalcato ruoterà attorno a  $cR$  e, con  $F_{\text{sisma}}$  positiva come in questo caso, farà ruotare l'impalcato in senso orario così come visibile nel file.DXF restituito dal software; contorno rosso rispetto al contorno bianco con amplificazione degli spostamenti pari a 100 volte.

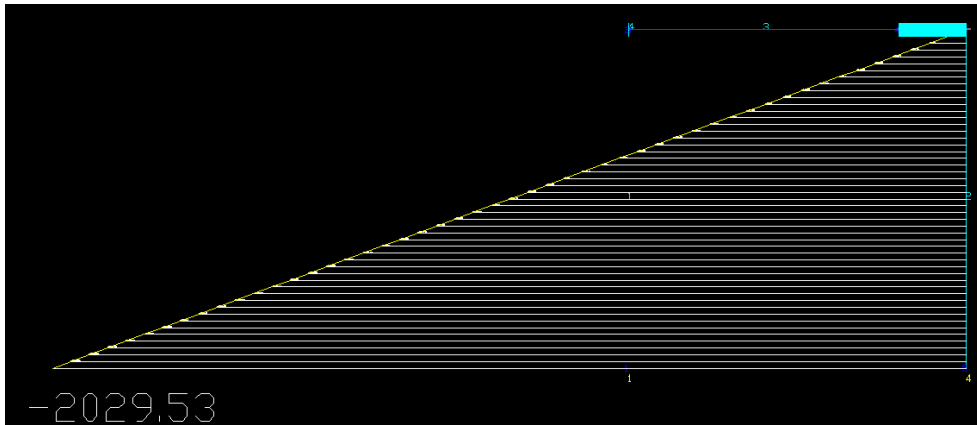


La parete 200x3000mm del telaio 1 si oppone da sola al sismaX. Infatti il momento flettente alla sua base è esattamente pari a tutta la forza sismica  $F_{sisma}=811.81\text{KN} \times 5\text{m}$  (altezza della parete)=**4'059.05** così come confermato dal diagramma del momento del Telaio 1.



Però le pareti parallele alla direzione Y in questo caso non sono scariche. Il loro momento alla base è pari a 2'029.53 KNm





Col sisma in direzione X. la coppia che fa girare l'impalcato è pari a  $F_{sisma} = 811.81 \text{ KN} \times 5 \text{ m}$  (distanza fra G e cR) = 4'059.05 KNm e, poiché il braccio, la distanza fra le due pareti Y è 10 m, ogni parete è sollecitata nel suo piano Rigido da una Forza = 4'059.05 KNm / 10 m = 404.91 KN che produce appunto un Momento alla base pari a  $404.91 \times 5$  (Hparete) = 2'029.53 KNm così come indicato dai diagrammi dei momenti dei Telai 2 e 3.

Abbiamo incominciato a ragionare in termini di Rigidità, abbiamo iniziato a capire come funziona il TelSpa, e abbiamo imparato a controllare l'attendibilità di un solutore di calcolo.

Abbiamo anche incominciato a capire come la natura si comporta nei confronti delle strutture sismoResistenti.

Un buon progetto deve tendere a far coincidere G con cR per limitare al massimo le rotazioni degli impalcati. In ogni caso si può sempre abbondare nelle sezioni dei pilastri come in questo caso. L'importante è contenere le deformazioni sia verticali che orizzontali nei limiti di legge.

Se ogni struttura sismoResistente periferica, per effetto delle rotazioni degli impalcati si sposta nei limiti di legge quando è sollecitata dal sisma di progetto, è tutto OK.

Però se  $G = cR$  occorrerà meno materiale per far rientrare la deformabilità nei limiti di legge.

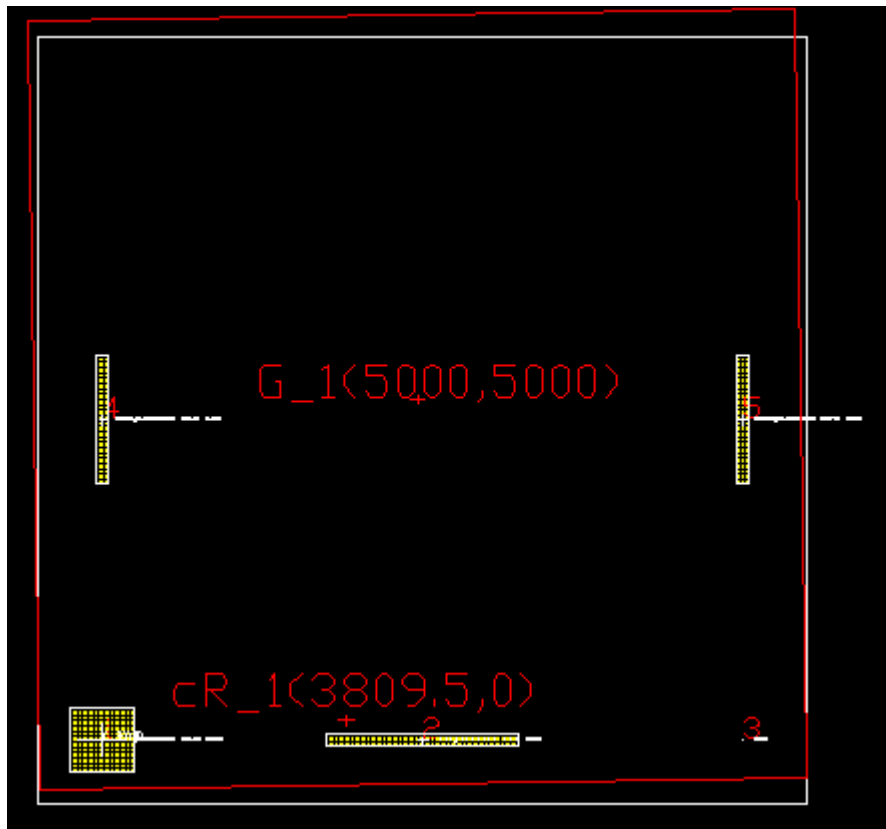
E' facile capire che per far coincidere G con cR in quest'esempio si può fare solo aggiungendo la stessa parete 200x3000mm che sta in basso, in alto, in posizione simmetrica rispetto a G.

Qualsiasi altra cosa ci andiamo a mettere, 2 pareti affiancate, un telaio, è difficile aggiungerci un'altra struttura piana che abbia la stessa rigidezza della parete 200x3000 e che contemporaneamente non turbi la simmetria rispetto alla retta G-cR; in direzione Y.

Comunque per incominciare a **pesare mentalmente** la RIGIDEZZA, il pilastro nullo a sinistra in basso sostituiamolo con un pilastro in c.a. quadrato 1000x1000mm di calcestruzzo.

Il centro delle rigidzze si deve spostare più a sinistra e leggermente più in alto perché apporta più rigidzza, rispetto al pilastro *nullo*, alla rigidzza globale. Di quanto si sposta? ce lo dirà il calcolo.

Fatte le correzioni e ripetuto il calcolo, viene restituito questo DXF con sisma in direzione Y.



Notare che le rigidità hanno perso la simmetria in direzione Y.

Il sisma Y, è sempre applicato in G che è rimasto simmetrico perché l'impalcato non è cambiato.

Il centro delle Rigidità cR ha invece come coordinate (3809.5,0) contro i (5000,0) di prima. Si è spostato verso il pilastro 1000x1000 così come doveva essere. Di quanto? di 1190.5mm. =5000-3809.5

La  $F_0$ =sisma Y applicata in G e rivolta verso l'alto.

Rispetto al centro di rotazione cR crea una coppia antioraria che fa ruotare l'impalcato in senso antiorario. Linea rossa rispetto a quella bianca amplificata come spostamenti di 100 volte.

Notare ancora che G e cR si sono spostati con l'impalcato. Le coordinate ne indicano invece la posizione quando l'impalcato era in quiete.

Abbiamo detto che se le travi, invece che incernierate le costruiamo incastrate, otteniamo un Telaio Piano: una struttura sismo resistente autonoma che resiste anche a Forze Orizzontali. Le travi, hanno un momento in mezzera per carichi verticali pari a  $Q \cdot L^2 / 24$  (3 volte più piccolo) senza avere problemi di deformabilità verticale perché l'abbassamento è pari a  $1/384 \cdot Q \cdot L^4 / (E \cdot J)$  5 volte più piccolo.

Se poi l'incastro è iper-rigido, cioè vincolato attraverso un tratto più rigido che assorbe il picco del momento all'incastro, allora questi vantaggi sono ancora più accentuati perché la luce si riduce, e la luce è al quadrato nel primo caso ed alla quarta nel secondo caso.

In caso di utilizzo dei telai, le pareti possono essere del tutto omesse oppure se previste, pareti e telai assorbiranno una aliquota di  $F_{sismica}$  proporzionale alle proprie rigidità.

La monolitica struttura in c.a. gettata in opera è adottata per quasi tutte le strutture intelaiate perché usufruisce di questi vantaggi.

Lo svantaggio più evidente è che non può essere prefabbricata.

E' artigianale.

Il Nodo Carante, con piccole travi metalliche all'interno delle travi composte in c.a., dà una marcia in più alle strutture in c.a. perché ne consente la prefabbricazione e poi permette di utilizzare anche in zona sismica le travi in c.a. a spessore di solaio. E' apportato un elevato grado

di duttilità globale consentendo, nel contempo, di avere una pianta libera utile per ovvi motivi architettonici.

Le travi a spessore di solaio, da sole, in zona sismica sono sconsigliate perché l'asse neutro capita in prossimità delle armature compresse che non lavorano. Non potendosi fare affidamento su di esse il calcestruzzo, limitato al solo copri ferro, si schiaccia o si rompe per instabilità.

L'utilizzo del Nodo Carannante, che ha collegamenti a completo ripristino della trave metallica nominale, apre a un nuovo sistema costruttivo prefabbricato *aperto* che non limita, anzi amplifica le potenzialità del Progettista strutturale, migliorando nel contempo anche la qualità della sola struttura in c.a. gettata in opera con l'apporto di un aumento della duttilità globale ed una migliore fruibilità degli spazi ai fini architettonici.

E' il caso di evidenziare che è sempre sconsigliato apportare irrigidimenti strutturali localizzati che attirano più sisma localmente con concentrazione di sforzi sia in elevazione che in fondazione.

Il meglio è una struttura egualmente equilibrata come il telaio spaziale regolare sia in pianta che in elevazione.