

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Strutture

Tesi di Laurea Magistrale

**Design computazionale ed evolutivo per il predesign di edifici
alti a telaio**



Relatore:

prof. Giuseppe Lacidogna

Co-Relatore:

prof.ssa Laura Sardone

Candidato:

Luca Re S322379

OTTOBRE 2025

ABSTRACT

La tesi esplora il potenziale del design computazionale integrato con algoritmi evolutivi per il predesign di edifici alti con sistema strutturale a telaio. È stato sviluppato un codice in *Rhino 8* e *Grasshopper* per la generazione del modello, con analisi FEM condotte in *Karamba 3D*.

L'ottimizzazione è stata affidata al plug-in *Galapagos*, impiegato per individuare la disposizione e la tipologia dei controventi e per definire famiglie di sezioni univoche per travi, pilastri e controventi. Parallelamente è stato utilizzato il modulo *Optimize Cross Section*, sia in modalità vincolata, per raggruppare elementi in famiglie coerenti di sezioni, sia in modalità libera, per assegnare sezioni distinte a ciascun elemento.

I risultati mostrano che la combinazione tra design computazionale e algoritmi genetici può produrre soluzioni leggere ed efficienti, soprattutto in strutture regolari e simmetriche. Tuttavia, in assenza di vincoli, l'ottimizzazione tende a ridurre la massa a scapito della fattibilità ingegneristica, mentre *Optimize Cross Section*, se lasciato libero, genera distribuzioni di sezioni difficilmente interpretabili. L'esperienza suggerisce quindi che questi strumenti non possano sostituire metodi consolidati di ottimizzazione, ma rappresentano un valido supporto nelle prime fasi di progetto, quando l'obiettivo è esplorare soluzioni alternative in modo rapido e flessibile, nel rispetto delle normative.

La tesi si articola in cinque capitoli: un'introduzione con il quadro teorico e le principali tecniche di ottimizzazione, un approfondimento sugli edifici alti e sulle strutture a telaio, la descrizione del programma sviluppato, la fase di ottimizzazione con *Galapagos* e, infine, diversi casi studio che hanno permesso di valutare l'efficacia del metodo variando vincoli di simmetria, disposizione dei controventi e carichi applicati. L'elaborato si conclude con una sintesi dei risultati e con l'indicazione di possibili sviluppi futuri, tra cui l'estensione dell'approccio all'analisi sismica.

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 - EDIFICI MULTIPIANO	5
1.1. Definizione di edificio alto	5
1.2. Storia degli edifici alti	8
1.2.1. Nascita degli edifici alti	8
1.2.2. Imprese ingegneristiche del 1800	9
1.2.3. La scuola di Chicago	10
1.2.4. New York	11
1.2.5. Mies Van der Rohe	12
1.2.6. New York anni 60-70	12
1.2.7. Diffusione in Oriente	13
1.2.8. XXI sec. e futuro	13
1.2.9. Riassunto dei record	14
1.3. Sistemi strutturali	15
CAPITOLO 2 - SISTEMA A TELAIO	21
2.1. Telaio	22
2.1.1. Telaio pendolare (con cerniere)	23
2.1.2. Telaio a nodi rigidi e semi-rigidi	24
2.2. Controventi	26
2.2.1. Concentrici	27
2.2.2. Eccentrici	32
2.3. Verifiche (EN 1993-1-1)	35
2.3.1. Verifica a trazione (EN 1993-1-1, §6.2.3)	40
2.3.2. Verifica a compressione (EN 1993-1-1, §6.3.1)	41
2.3.3. Verifica a flessione + sforzo assiale (EN 1993-1-1, §6.2.9)	48
2.3.4. Verifica spostamenti massimi	51
2.3.5. Altre verifiche (EN 1993-1-1)	51
CAPITOLO 3 – DESIGN PARAMETRICO	52

3.1.	Obiettivo ed ipotesi	52
3.2.	Software utilizzati	54
3.3.	Realizzazione geometria	55
3.3.1.	Modulo tipo	55
3.3.2.	Controventi	56
3.3.3.	Generazione struttura multi-piano e multi-modulo	58
3.4.	Calcolo e applicazione dei carichi	62
3.4.1.	Carichi permanenti	62
3.4.2.	Carichi variabili	62
3.4.3.	Vento	62
3.4.4.	Combinazione dei carichi	71
3.4.5.	Applicazione dei carichi	73
3.5.	Assegnazione sezioni e materiale	75
3.6.	Definizione dei vincoli esterni	77
3.7.	Analisi della struttura	78
3.8.	Confronto risultati FEM (SAP2000)	82
3.8.1.	Controvento a K	83
3.8.2.	Controvento a diagonale compressa	84
3.8.3.	Controvento a diagonale tesa	85
3.8.4.	Controvento a V	86
3.8.5.	Controvento a V rovesciata	87
3.8.6.	Controvento a X	88
CAPITOLO 4 – OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA EVOLUTIVA		89
4.1.	Funzionamento solutore evolutivo (Galapagos)	89
4.2.	Definizione matematica	91
4.3.	Procedimento	93
4.4.	Optimize Cross Section	98
CAPITOLO 5 – CASI STUDIO		101
5.1.	Strutture	102

5.1.1.	Geometria	102
5.1.2.	Carichi	103
5.2.	Casi studio – risultati	107
5.2.1.	Caso studio 1	107
5.2.2.	Caso studio 2	112
5.2.3.	Caso studio 3	117
5.2.4.	Caso studio 4	120
5.3.	Casi studio - Discussione dei risultati	127
CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI		131
APPENDICE A		132
APPENDICE B		139
	Codice completo	139
	Script Python (penalty function)	142
	Script Python (posizionamento controventi)	144
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA		145
	Articoli e libri	145
	Normativa	147
	Sitografia	147

Indice delle figure

Figura 1 Classificazione in base al contesto	5
Figura 2 Classificazione in base alle proporzioni	6
Figura 3 Classificazione Tall, Supertall, Megatall	6
Figura 4 Sistema di funzionamento dell'ascensore	9
Figura 5 Wainwright Building	11
Figura 6 Empire State Building	11
Figura 7 Sears Tower	12
Figura 8 World Trade Center	12
Figura 9 Edifici più alti al mondo	14
Figura 10 Collaborazione setto-telaio	16
Figura 11 Funzionamento edificio a telaio tubolare	17
Figura 12 Willis Tower	18
Figura 13 Outrigger Structure	20
Figura 14 Belt truss	20
Figura 15 Massime altezze per edifici a telaio	21
Figura 16 Grafico momento-curvatura	23
Figura 17 Collaborazione telaio+controvento	24
Figura 18 Deformata telaio flessionale e tagliante	25
Figura 19 Deformata mensola tagliante e flessionale	25
Figura 20 Funzionamento controventi	26
Figura 21 Tipologie controventi	28
Figura 22 Forze nelle aste	30
Figura 23 Funzionamento controvento a V rovesciata	31
Figura 24 Tipologie controventi eccentrici	33
Figura 25 Funzionamento del link	35
Figura 26 Diagramma di resistenza in base alla classificazione	40
Figura 27 Lunghezza libera di inflessione	44
Figura 28 Diagramma di flusso (flow chart)	53
Figura 29 Codice - Generazione modulo tipo	56
Figura 30 Rhino - modulo tipo	56
Figura 31 Rhino - Pattern 0	57
Figura 32 Rhino - Pattern 1	57
Figura 33 Rhino - Pattern 2	57
Figura 34 Rhino - Pattern 3	57
Figura 35 Rhino - Pattern 4	57

Figura 36 Rhino - Pattern 5	57
Figura 37 Codice - Definizione pattern	58
Figura 38 Codice - Parametri input	59
Figura 39 Codice - Creazione struttura 2D - Travi	59
Figura 40 Codice - Creazione struttura 2D - Pilastri	59
Figura 41 Rhino - Numerazione moduli	60
Figura 42 Codice - Creazione struttura 2D - Controventi	61
Figura 43 Rhino - Esempio disposizione controventi	61
Figura 44 Codice - gestione controventi	62
Figura 45 CNR-DT 207 R1/2018 – Processo Analisi	64
Figura 46 CNR-DT 207 R1/2018 – Definizione altezza di riferimento	69
Figura 47 Codice - Definizione nodo di carico	73
Figura 48 Codice - Applicazione dei carichi	75
Figura 49 Codice - Definizione materiale	76
Figura 50 Codice - Assegnazione delle sezioni	77
Figura 51 Codice - Collezione degli elementi	77
Figura 52 Codice - Definizione dei nodi	78
Figura 53 Definizione dei vincoli	78
Figura 54 Convenzione dei segni Karamba 3D	80
Figura 55 Codice - Analisi struttura	80
Figura 56 Rhino - Risultati analisi	81
Figura 57 Validazione - Controventi a K (carichi, sforzo normale, momento)	83
Figura 58 Validazione - Controventi a diagonale compressa (carichi, sforzo normale, momento)	84
Figura 59 Validazione - controventi a diagonale tesa (carichi, sforzo normale, momento)	85
Figura 60 Validazione - Controvento a V (carichi, sforzo normale, momento)	86
Figura 61 Validazione - Controvento a V rovesciata (carichi, sforzo normale, momento)	87
Figura 62 Validazione - Controvento a X (carichi, sforzo normale, momento)	88
Figura 63 Distribuzione 1	90
Figura 64 Distribuzione 2	90
Figura 65 Distribuzione 3	90
Figura 66 Distribuzione 4	90
Figura 67 Probabilità di accoppiamento	91
Figura 68 Codice - Script Python ottimizzazione	94
Figura 69 Codice - Ottimizzazione	95
Figura 70 Codice - Impostazioni ottimizzazione	95
Figura 71 Codice - Solver ottimizzazione	96

Figura 72 Codice - Grafico ottimizzazione	97
Figura 73 Codice - Optimize Cross section	99
Figura 74 Codice – Impostazioni Optimize Cross Section	102
Figura 75 Applicazione - Disposizione carichi struttura 1	106
Figura 76 Applicazione - Disposizione carichi struttura 2	106
Figura 77 Caso studio 1 - Disposizione controventi	107
Figura 78 Caso studio 1.1 - Step 1- risultati	108
Figura 79 Caso studio 1.1 - Step 2 - Risultati	108
Figura 80 Caso studio 1.1 - Step 3 – Risultati	109
Figura 81 Caso studio 1.2 - Step 1 - Risultati	109
Figura 82 Caso studio 1.2 - Step 2 – Risultati	110
Figura 83 Caso studio 1.2 - Step 3 – Risultati	110
Figura 84 Caso studio 1.3 - Step 1 – Risultati	111
Figura 85 Caso studio 1.3 - Step 2 - Risultati	111
Figura 86 Caso studio 1.3 - Step 3 - Risultati	112
Figura 87 Caso studio 2 - Disposizione controventi	112
Figura 88 Caso studio 2.1 - Step 1 – Risultati	113
Figura 89 Caso studio 2.1 - Step 2 – Risultati	113
Figura 90 Caso studio 2.1 - Step 3 – Risultati	114
Figura 91 Caso studio 2.2- Step 1 – Risultati	114
Figura 92 Caso studio 2.2 - Step 2 – Risultati	115
Figura 93 Caso studio 2.2 - Step 3 – Risultati	115
Figura 94 Caso studio 2.3 - Step 1 – Risultati	116
Figura 95 Caso studio 2.3 - Step 2 - Risultati	116
Figura 96 Caso studio 2.3 - Step 3 – Risultati	117
Figura 97 Caso studio 3.1 - Step 1 - Risultati	118
Figura 98 Caso studio 3.1 - Step 2 – Risultati	118
Figura 99 Caso studio 3.1 - Step 3- Risultati	119
Figura 100 Caso studio 3.2 - Step 1 – Risultati	119
Figura 101 Caso studio 3.2 - Step 2 - Risultati	120
Figura 102 Caso studio 3.2 - Step 3 - Risultati	120
Figura 103 Caso studio 4.1 - Step 1 - Risultati	121
Figura 104 Caso studio 4.1 - Step 2 – Risultati	121
Figura 105 Caso studio 4.1 - Step 3 - Risultati	122
Figura 106 Caso studio 4.2 - Step 1 – Risultati	122
Figura 107 Caso studio 4.2 - Step 2 - Risultati	123

Figura 108 Caso studio 4.2 - Step 3 – Risultati	123
Figura 109 Caso studio 4.3 - Step 1 - Risultati	124
Figura 110 Caso studio 4.3 - Step 2 - Risultati	124
Figura 111 Caso studio 4.3 - Step 3 - Risultati	125
Figura 112 Caso studio 4.4 - Step 1 – Risultati	125
Figura 113 Caso studio 4.4 - Step 2 - Risultati	126
Figura 114 Caso studio 4.4 - Step 3 – Risultati	126

Indice dei grafici

Grafico 1 Classifica in base al picco	7
Grafico 2 Legge costitutiva acciaio	37
Grafico 3 Classificazione delle sezioni	38
Grafico 4 Curva euleriana	45
Grafico 5 Carico critico	46
Grafico 6 Confronto curve con imperfezioni oppure senza imperfezioni	46

Indice delle tabelle

Tabella 1 Classificazione edifici più alti	7
Tabella 2 Riassunto edifici alti	14
Tabella 3 Frame tube, Braced Frame, Tube in tube, Bundle Tube	18
Tabella 4 Diagrid	19
Tabella 5 Tabella 3.1 EN 1993-1-1	37
Tabella 6 Classificazione secondo EN 1993-1-1	39
Tabella 7 Coefficienti β_2 e β_3	41
Tabella 8 Fattore di imperfezione α	47
Tabella 9 Definizione curve di instabilità	48
Tabella 10 Parametri per instabilità flessione-torsionale	50
Tabella 11 CNR-DT 207 R1/2018 – $v_{b,0}$, a_0 , k_s	65
Tabella 12 CNR-DT 207 R1/2018 - Parametri per coefficiente di esposizione	66
Tabella 13 CNR-DT 207 R1/2018 - Classe di rugosità	67
Tabella 14 CNR-DT 207 R1/2018 - Classe di esposizione del sito	67
Tabella 15 CNR-DT 207 R1/2018 - Coefficiente di pressione esterna	68
Tabella 16 CNR-DT 207 R1/2018 - Parametro k	70
Tabella 17 NTC2018 - Coefficienti parziali di sicurezza	72
Tabella 18 NTC2018 - Coefficienti di combinazione per carichi variabili	72
Tabella 19 Validazione codice - Proprietà struttura	82
Tabella 20 Validazione codice - Errori %	82
Tabella 21 Impostazione sezioni	102
Tabella 22 Applicazione - Proprietà struttura	103
Tabella 23 Applicazione - Calcolo carico vento (Proprietà sito)	103
Tabella 24 Applicazione - Parametri calcolo del vento	103
Tabella 25 Applicazione - Calcolo coefficiente dinamico	104
Tabella 26 Applicazione - Carico vento	105
Tabella 27 Confronto Struttura 1 e Struttura 2	128

INTRODUZIONE

Il predimensionamento strutturale è una fase cruciale per la progettazione di un edificio, perché consente di definire le dimensioni di massima degli elementi portanti della struttura. In questo step, il progettista utilizza schemi statici semplificati e calcoli approssimati in modo da determinare forme e dimensioni iniziali. Successivamente, con analisi più dettagliate e più complicate, definisce le sezioni finali in modo da soddisfare le verifiche richieste da normativa. Spesso, l'obiettivo principale non è solo garantire le resistenze necessarie, ma anche minimizzare il materiale utilizzato. Questo aspetto è strettamente collegato alla sostenibilità dell'edificio, alla riduzione dei costi e alla massa complessiva della struttura. Per questo motivo, il predimensionamento richiede una fase di ottimizzazione collegato al design della struttura.

I problemi affrontati dall'ottimizzazione strutturale possono essere suddivisi in tre categorie principali:

- Ottimizzazione dimensionale (*size optimization*)
- Ottimizzazione di forma SO (*shape optimization*)
- Ottimizzazione topologica TOD (*topology optimization*)

Queste tre categorie sono direttamente ricollegate alle fasi della progettazione: TOD viene usato nella fase di progettazione concettuale, SO nella fase di progettazione di realizzazione e l'ottimizzazione dimensionale è ricondotta alla fase di progettazione dettagliata.

L'ottimizzazione dimensionale è una tecnica che consente di trovare le dimensioni ottimali di un elemento in modo da soddisfare determinati obiettivi come massimizzare la resistenza, minimizzare il peso, ecc. Questa si concentra ad esempio su quale sezione usare o sulle dimensioni di un elemento. Diverse sono le soluzioni proposte in letteratura per cercare di ridurre il costo computazionale o per analizzare diversi aspetti. Un modello meta-euristico (*Mashayekhi et al., 2023*) nella quale si integra Particle Swarm Optimization (PSO) con Harris Hawk Optimization (HHO) è stato proposto per progettare travi a castelletto (travi d'acciaio create tagliando una trave standard a I con un andamento ondulato, successivamente separate e traslate l'una rispetto all'altra per aumentarne l'altezza e creare dei buchi nell'anima). Particle Swarm Optimization è un modello computazione che ottimizza un problema cercando iterativamente di migliorare la soluzione candidata rispetto ad una misura di qualità. Harris Hawk Optimization (HHO) deriva dalla strategia di caccia dei falchi che attaccano in gruppo per sorprendere la preda. Il processo si divide in esplorazione, fase in cui i falchi cercano la preda in diverse aree di dominio e lo sfruttamento, in cui i falchi circondano la preda e la attaccano in modo rapido e coordinato. La soluzione proposta da *Mashayekhi et al.* è usata per determinare il costo complessivo, comprese le spese di costruzione e dei materiali. Lo sviluppo dell'algoritmo PSO ha

portato all'ideazione di una sua versione avanzata: BCLPSO (Binary Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization) (*Su et al., 2023*). All'interno del loro articolo hanno suggerito questo modello per la progettazione ottimale di telai in acciaio. L'algoritmo simula il comportamento di uno sciame di particelle che imparano dal loro successo e da quello dell'intero gruppo. A partire dal metodo GOA (Grasshopper Optimization Algorithm) (*Saremi e Mirhalili, 2017*), è stato sviluppato un altro processo per l'ottimizzazione di strutture a telaio (*Aydogdu, 2022*). Questo principio è nato dallo studio del comportamento delle cavallette in natura.

L'ottimizzazione della forma (shape optimization) è una tecnica che consente di trovare la forma geometrica ideale di una struttura ai fini di soddisfare alcuni obiettivi: migliorare le prestazioni, ridurre il peso, minimizzare i costi ecc. Questo processo può essere eseguito in continuo o in discreto. SO continuo risolve problemi di ottimizzazione di forma nel contesto di strutture continue 2D e 3D. In discreto, invece, si esegue l'ottimizzazione della forma attraverso variazioni nella geometria di strutture reticolari e a telaio con variazioni nella posizione dei nodi. Diverse sono le proposte in letteratura. Per strutture a telaio compatte, è stato proposto un metodo di morfogenesi basato sulla sensibilità nodale ed elementare (*Cui et al., 2014*). Per definizione il metodo di morfogenesi è un approccio progettuale che mira a generare la forma di una struttura. L'obiettivo di questo metodo è minimizzare i momenti flettenti trasformando le sollecitazioni in carichi assiali. Per strutture solide a guscio e a telaio, è stata proposta una soluzione non parametrica (*Shimoda et al. 2019*).

L'ottimizzazione topologica (topology optimization) è una tecnica usata al fine di determinare la miglior disposizione del materiale ed eliminare quello in eccesso dove non serve. Viene proposta per migliorare la distribuzione del materiale, la stabilità, la rigidità ecc. Anche in questo caso, si può parlare di TOD continuo e TOD discreto. Nel primo, il dominio di progettazione è discretizzato in piccoli elementi rettangolari in cui ogni elemento può essere pieno o vuoto. Nel TOD discreto, invece, si determina la connettività ottimale degli elementi a partire da un numero finito di connessioni. Diverse tecniche sono presenti in letteratura. Un procedimento base usato è il metodo di punti interni per la programmazione lineare (*Karmarkar, 1984*). Questo processo coniuga la complessità polinomiale ed efficienza pratica. Il punto cruciale della teoria è il concetto di cammino centrale, definita come una curva continua all'interno dell'insieme ammissibile che converge verso un punto ottimo all'interno del dominio, delimitato con una funzione barriera. Il metodo dei punti interni è stato utilizzato sia per approcci lineari (*Gao et al., 2015*) che non lineari (*Yamada et al., 2016*). *Changizi et al.* hanno sviluppato diversi processi per eseguire l'ottimizzazione: un metodo è basato sulle sollecitazioni e perturbazioni stocastiche usando tecniche di ottimizzazione non lineare vincolate; un altro è relativo all'ottimizzazione di strutture a telaio in acciaio trovando la disposizione ottimale di sezioni trasversali standard.

A questi problemi di ottimizzazione è possibile introdurre l'ottimizzazione evolutiva. Essa si basa su un approccio in cui, in una popolazione, più di una soluzione partecipa ad un'iterazione e sviluppa una nuova popolazione da analizzare nell'iterazione successiva. Rispetto ai metodi classici, eseguono una ricerca diretta alla soluzione migliore, senza dipendere dall'impostazione di un gradiente. Inoltre, consentono di analizzare una popolazione di soluzioni, permettendo un'elaborazione parallela di più opzioni contemporaneamente. Al contrario, i metodi classici permettono di analizzare una sola soluzione per volta. Questo vantaggio è soprattutto utilizzato per problemi multi-obiettivo EMO. Infine, rispetto ai metodi classici che usano regole fisse e deterministiche per aggiornare le soluzioni, l'ottimizzazione evolutiva impiega operatori stocastici basati sulla probabilità. Questi permettono di esplorare al meglio lo spazio delle soluzioni senza bloccarsi in soluzioni ottimali locali. Il funzionamento iterativo può essere riassunto come:

1. Definizione dei membri migliori della popolazione;
2. Ricombinazione e perturbazione delle soluzioni migliori;
3. Prosecuzione fino a quando viene soddisfatto un criterio di arresto predefinito.

Il principale vantaggio dell'algoritmo evolutivo è la flessibilità con la possibilità di scegliere operatori personalizzati e informazioni specifiche, ma che implicano enorme responsabilità dell'utente. Questi algoritmi vengono però utilizzati per affrontare problemi reali complicati, come funzioni obiettivo non derivabili, problemi non lineari, variabili discrete, problemi di grandi dimensioni ed altri. All'interno della famiglia dell'ottimizzazione evolutiva si inseriscono gli algoritmi genetici GA il cui processo prevede la fase di selezione, crossover e mutazione. Esso è composto da due fasi: inizialmente esegue una ricerca più globale mantenendo una popolazione ampia e diversificata, mentre in un secondo step si avvicinano i membri della popolazione. I GA sono stati applicati alle diverse tipologie di ottimizzazione descritte in precedenza:

- applicato a TOD in continuo per ottimizzare la distribuzione del materiale in strutture come piastre a sbalzo (ad esempio soluzioni proposte da *Sangren e Jensen*);
- applicato a TOD discreto per ottimizzare capriate, telai e strutture 3D (esempi inerenti sono le proposte di *Shankar, Hajela*);
- applicato a TOD per conservare il peso e costruire strutture di copertura a telaio spaziale in acciaio usando sezioni cave rettangolari (*Kociecki*);
- applicato a SO continuo per ottimizzare forme complesse come gusci ovali e modelli 3D (ad esempio le soluzioni di *Jenkins e Richards*);
- applicato a SO discreto per ottimizzare forme planari e spaziali (ad esempio *Grierson, Soh e Yang*);
- applicato ad ottimizzazione dimensionale per ottimizzare travi, capriate e telai saldati (soluzioni come quelle di *Goldberg, Hajela, Deb e Jenkins*)

Questi algoritmi genetici possono essere applicati ad un processo di design parametrico. La progettazione parametrica è un approccio basato su variabili, relazioni logiche e regole computazionali. L'idea di questa tecnica permette al progettista di definire parametri controllabili, come dimensioni, sezioni, materiali stabilendo relazione tra di essi. Di conseguenza, non è richiesta la modellazione di ogni singolo elemento, ma il modello si genera e si aggiorna automaticamente. La progettazione può essere, quindi, definita come dinamica. I processi parametrici sono rappresentati come grafi diretti costituiti da nodi e archi: i primi contengono le proprietà del progetto, mentre il secondo le dipendenze tra proprietà. Essi consentono di generare automaticamente molteplici alternative progettuali. La limitazione riscontrata inizialmente è la possibilità di visualizzare una sola alternativa alla volta. *Woodbury et al. (2017)* hanno proposto una soluzione di galleria interattiva che consente di salvare e visualizzare più alternative contemporaneamente, combinare alternative e utilizzare subjunctive interfaces che permettono la gestione parallela di altri scenari. L'approccio descritto permette di analizzare più soluzioni contemporaneamente per determinare quella ottimale.

A partire da queste indagini di letteratura, la proposta è quella di integrare il design parametrico con un algoritmo genetico in modo da determinare la soluzione ottimale per un edificio alto con struttura a telaio. L'integrazione dei due processi consente di analizzare più strutture contemporaneamente, variando i parametri come sezioni della struttura o tipologia di controvento per determinare la configurazione ottimale.

CAPITOLO 1 - EDIFICI MULTIPIANO

“I grattacieli non sono solo il luogo del business, ma sono essi stessi un business”.

Questa è una celebre frase di *Carol Willis*, fondatrice e direttrice dello Skyscraper Museum, locato nel quartiere Battery Park City di Manhattan a New York, in cui ci si concentra sulla storia evolutiva della costruzione degli edifici alti. La frase è strettamente legata all'utilizzo dei grattacieli come sede di uffici, hotel e altre attività, rappresentatrici del business. Allo stesso tempo, la loro costruzione richiede circoli monetari importanti, che possono superare anche il miliardo di euro. La giusta gestione economica dei materiali, delle tecniche costruttive, degli elementi utilizzati può portare ad una riduzione della spesa e risulta cruciale per la realizzazione della struttura. Tuttavia, la riduzione dei costi deve, comunque, garantire e assicurare le prestazioni dell'opera. L'ottima riuscita della progettazione, però, non riguarda esclusivamente la verifica delle resistenze degli elementi per evitare il collasso, ma, negli ultimi decenni, anche del confort per gli utenti. Le eccessive vibrazioni, spostamenti orizzontali e rotazioni della struttura causate dalle forze orizzontali possono risultare facilmente percepibili dall'uomo. Sia il vento che le azioni sismiche, esempi di forze orizzontali, sono le azioni principali da tenere in considerazione per la progettazione e la verifica di un grattacielo.

Oggigiorno, l'idea di grattacielo come esclusivo posto del business si sta ridimensionando, in quanto sono sempre più frequenti edifici alti residenziali. La richiesta di avvicinamento alle zone residenziali ed industriali è aumentata, ma il suolo edificabile disponibile scarseggia. Questo ha obbligato gli ingegneri a realizzare strutture sempre più alte con una base sempre più stretta, ovvero sempre più snelle e vulnerabili alle azioni orizzontali.

1.1. Definizione di edificio alto

Non esiste una definizione vera e propria di edificio alto, anzi è soggettiva. Come dice il Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH), ente sviluppatore delle leggi internazionali per misurare e definire gli edifici alti, dipende da diversi concetti:

- *In base al contesto*: è legato alle costruzioni che circondano l'edificio. Infatti, come riportato da CTBUH, un edificio di 14 piani non può essere considerato alto in città come Chicago o Hong Kong, ma in una città di provincia europea, può essere considerato tale. Il concetto può essere rappresentato dalla Figura 1.



Figura 1 Classificazione in base al contesto

- *In base alle proporzioni:* è sostanzialmente legato al rapporto base-altezza. Ci sono alcuni edifici che, pur non avendo altezze elevate, hanno una base ristretta e la loro snellezza li rende particolarmente soggetti a forze orizzontali. Allo stesso modo, ci sono edifici con basi estremamente larghe e, anche se alti, non sono suscettibili alle azioni di vento e sisma. Il CTBUH propone la Figura 2.
- *In base alle tecnologie utilizzate:* ascensori, controventi strutturali ed altre tecnologie possono essere associate ad edifici alti.



Figura 2 Classificazione in base alle proporzioni

Uno o più di questi fattori possono associare ad un edificio, la definizione di alto. Il CTBUH prova a dare una valutazione anche in numero di piani, seppure molto soggettiva. Oltre al numero di piani, si dovrebbe anche associare l'altezza di piano, perché solo così è possibile individuare l'altezza totale. Il Concilio pone come limite inferiori 14 piani o 50 m di altezza. Edifici con caratteristiche maggiori posson essere definiti alti.

È prevista anche un'ulteriore suddivisione all'interno degli edifici alti. Esistono i cosiddetti “edifici super alti” e “mega alti”. I primi hanno un'altezza superiore ai 300 m, mentre il secondo oltre i 600 m. La Figura 3 ne rappresenta il confronto.

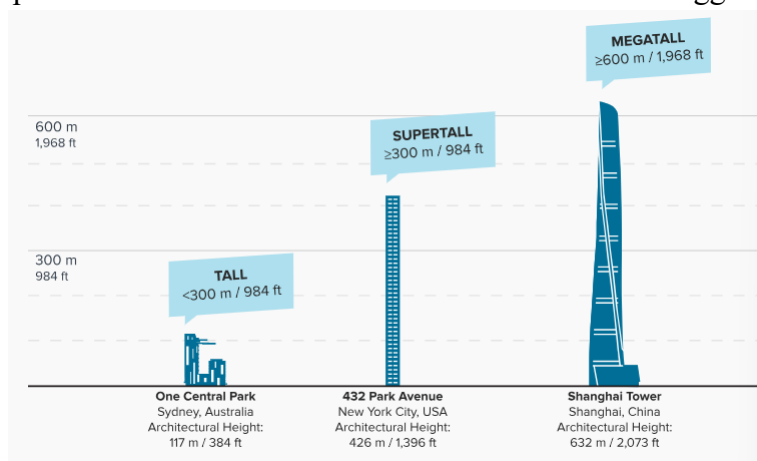


Figura 3 Classificazione Tall, Supertall, Megatall

Il CTBUH mette in risalto un altro aspetto fondamentale della definizione di edificio alto: qual è l'altezza da considerare? Sono riconosciute diverse misure possibili:

- *Altezza della sommità architettonica:* tiene in considerazione degli elementi architettonici dell'edificio. Di conseguenza, vengono comprese le guglie, ma non le antenne o la segnaletica. (H1)
- *Altezza del piano più alto occupabile.* (H2)
- *Altezza del punto più alto dell'edificio:* tiene in considerazione il punto più alto della struttura, compreso di antenne e pennacchi. (H3)

La scelta dell'altezza cambia anche la classifica degli edifici più alti. Di seguito sono proposte le classifiche degli edifici più alti individuati dal CTBUH.

Edificio	H1		H2		H3	
	Altezza [m]	Pos. Classifica	Altezza [m]	Pos. Classifica	Altezza [m]	Pos. Classifica
Burj Khalifa	828	1°	585	1°	830	1°
Shanghai Tower	632	2°	583	2°	632	2°
Makkah Royal Clock Tower Hotel	601	3°	494	7°	601	3°
Ping An Finance Center	599	4°	562	3°	599	4°
Lotte World Tower	555	5°	498	5°	556	5°
One World Trade Center	541	6°	-	-	546	6°
Guangzhou CTF Finance Centre	530	7°	495	6°	530	7°
China Zun	528	8°	514	4°	528	9°
Taipei 101	508	9°	438	10°	508	10°
Shanghai World Financial Center	492	10°	474	8°	-	
International Commerce Centre	-	-	469	9°	-	
Willis Tower	-	-	-	-	527	8°

Tabella 1 Classificazione edifici più alti

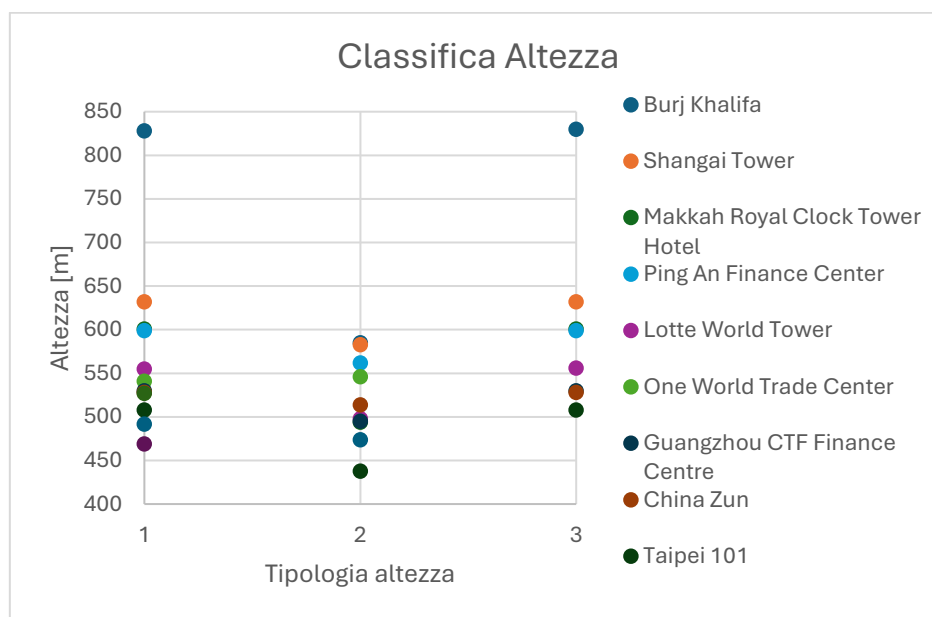


Grafico 1 Classifica in base al picco

Il Grafico 1 mette in mostra come la scelta della misura dell'altezza possa influenzare sia sull'ordine di classifica che sulla caratteristica propria dell'edificio. Ad esempio, se si analizza il Burj Khalifa con la quota del piano abitabile, la sua altezza passa da oltre 800 m a valori vicini a 600 m. L'ordine della classifica viene anche influenzato; infatti, l'esempio lampante è l'edificio Makkah Royal Clock Tower Hotel, in cui risulta essere il terzo della classifica degli edifici più alti con il primo e il terzo metodo di misura, ma con il secondo scende addirittura al settimo posto.

Per i motivi indicati in precedenza non è possibile fornire una rigorosa definizione di edificio alto. Aspetta all'ingegnere valutare la tipologia di costruzione, ponendo particolare attenzione agli effetti delle azioni orizzontali.

In letteratura e nelle normative si possono trovare alcune definizioni che mettono in mostra quanto indicato in precedenza:

- *NTC2018*: la normativa italiana non fornisce alcuna informazione precisa sulla definizione di edifici alti. Si può leggere nel *Paragrafo 3.3* la distinzione tra costruzioni usuali e inusuali, di grande altezza o lunghezza. Questa distinzione è legata al calcolo dell'azione del vento. Non dà però informazioni precise sulla misura.
- *Guidance notes for Design Code*: nel *Paragrafo 116*, definisce l'edificio alto come quell'edificio che supera l'altezza limite da normativa.
- *International Code Council (ICC)*: nella *Sezione 202* un edificio è considerato alto quando c'è un piano occupato a più di 75 ft (23 m) sopra il livello più basso di accesso dei veicoli dei vigili del fuoco.
- *London Plan (2021)*: richiede alle autorità locali di definire un edificio alto in base all'evidenza dal contesto locale, e se questa non ci fosse, in base alla soglia minima definita dalla *policy D9*: "In base al contesto locale, i piani di sviluppo dovrebbero definire cosa è considerato come edificio alto, la cui altezza varierà all'interno delle diverse parti di Londra, ma non dovrebbe essere inferiore a 6 piani o 18 m misurati dal suolo al livello del pavimento del piano più alto".

1.2. Storia degli edifici alti

Gli edifici alti sono presenti già da molti secoli, ma l'avvento di nuovi materiali e tecnologie ha consentito di incrementare l'altezza. Di seguito è ripercorsa brevemente la storia che ha portato alla costruzione di edifici che raggiungono anche 800 m di altezza.

1.2.1. Nascita degli edifici alti

Per circa 3800 anni, la Grande Piramide di Giza fu l'edificio più alto con i suoi 146.5 m. Realizzata in blocchi, nel corso degli anni a causa dei fenomeni atmosferici la sua altezza è stata ridotta fino a 138.8 m. Essa fu utilizzata come sepolcro del faraone Cheope, vissuto intorno al 2560 a.C. Il suo primato fu sconfitto dalla Cattedrale di Lincoln nel 1311. Questo edificio religioso era dotato di una guglia alta 160 m che gli consentì di raggiungere la vetta della classifica mondiale, anche se alcuni studiosi sono dubbiosi dell'effettiva misura. Purtroppo, però, un crollo distrusse la guglia originale e attualmente è possibile vederne una alta 80 m. La cattedrale derivò dalla ristrutturazione della cattedrale stessa sotto la guida di Alessandro di Lincoln che subì un incendio prima e un terremoto successiva. È un esempio tipico di struttura gotica classica inglese dotata di arco a sesto acuto. Tra la

Grande piramide di Giza e la cattedrale di Lincoln, altre strutture vennero descritte come alte. Ad esempio, nel 280 a.C ad Alessandria d'Egitto venne edificato un faro con un'altezza di 130 m. Faceva parte delle Sette Meraviglie del Mondo Antico, ma purtroppo un terremoto nel XIV secolo lo distrusse. I romani, invece, costruirono torri usate con scopo di difesa e controllo delle mura delle città. Proseguendo dalla Cattedrale di Lincoln, proprio il crollo negli anni successivi permise ad altre strutture di raggiungere la vetta della classifica. Quest'ultime, però, risultavano più basse della guglia originale della Cattedrale di Lincoln. Alcuni esempi sono la cattedrale di Santa Maria in Stralsund o la cattedrale di St. Pierre in Beauvais.

Finora, però, si è parlato di edifici religiosi, ma nel corso degli anni vennero realizzati edifici alti anche con scopo abitativo. L'idea delle costruzioni con sviluppo verticale è nata nel corso dei secoli dovuta all'urbanizzazione e a città sempre più affollate. Lo sviluppo delle tecnologie permise di realizzare nuove strutture e tipologie. Un esempio di edificio alto può essere la città yemenita di Shibam del XVI secolo. Essa fu realizzata con case-torri in mattoni di fango alte da cinque a otto piani, utilizzate come difesa per gli abitanti locali dai beduini. Questa città è conosciuta come la più vecchia città-grattacielo del mondo o la Manhattan del deserto.

1.2.2. Imprese ingegneristiche del 1800

Il record della Cattedrale di Lincoln venne superato dalla Mole Antonelliana, un edificio monumentale di Torino, progettato da Alessandro Antonelli. È alto 167.5 m ed è stato riconosciuto fino al 1908 come edificio più alto del mondo in muratura. Successivamente venne ristrutturato con aggiunta di cemento armato e travi di acciaio. Nel 1889, in contemporanea con la Mole Antonelliana, venne realizzata la Tour Eiffel, a Parigi. Progettata da Eiffel, possiede un'altezza di 300 m. L'altezza fu raggiunta grazie all'invenzione del ferro battuto durante la Seconda Rivoluzione Industriale.

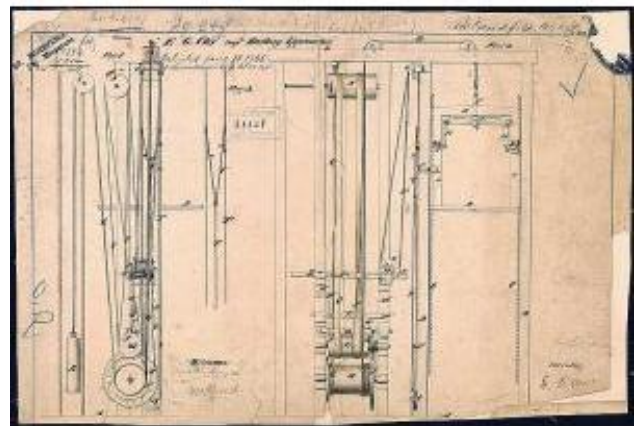


Figura 4 Sistema di funzionamento dell'ascensore

Nel XIX secolo, l'invenzione dell'ascensore prima a vapore, poi idraulico e infine elettrico, è stato un punto cruciale per la realizzazione edifici alti ad uso residenziale. Fu brevettato da Elisha Graves Otis nel 1853 a New York. Il principio di funzionamento si basava su un tamburo su cui venne avvolta la fune che sorregge la cabina sospesa. Contemporaneamente, per equilibrare i pesi, era presente una fune collegata con il contrappeso. La Figura 4 mostra il progetto del sistema nel dettaglio.

Nello stesso periodo, la Prima Rivoluzione Industriale permise di sviluppare nuove tecnologie che resero automatizzata la produzione di elementi di acciaio. Questi nuovi processi consentirono di ridurre i prezzi e aumentare l'utilizzo dell'acciaio; sfruttando le sue ottime proprietà di resistenza e alla scarsa massa, fu possibile creare strutture sempre più alte e snelle delle tradizionali, sviluppare sistemi costruttivi a telaio e modulari, e realizzare aperture più ampie. Per collegare gli elementi in acciaio, furono introdotte componenti di collegamento strutturali, come i bulloni, prodotti in industria e non artigianali come in precedenza.

Sia l'ascensore elettrico che l'industrializzazione dell'acciaio trovarono largo impiego a partire dalla ricostruzione di Chicago a seguito del vasto incendio che la devastò nel 1871. Le fiamme si sono diramate a partire dal "quartiere olandese" e hanno coinvolto gli edifici che erano realizzati in ghisa e in legno, suscettibili al fuoco. La prosperità economica della città di quegli anni e l'elevato costo del terreno edificabile nelle aree urbane permise lo sviluppo delle strutture in altezza, con la nascita dei primi grattacieli.

1.2.3. La scuola di Chicago

La ricostruzione di Chicago fu intrapresa dagli architetti e ingegneri che vennero etichettati con il nome di "Scuola di Chicago". Non fu una vera e propria istituzione, ma riunì tutti coloro che avevano caratteristiche affini nella progettazione. La base della scuola fu sicuramente l'idea dello sviluppo dei cosiddetti "grattacieli" per minimizzare l'uso delle aree urbane. Inoltre, le nuove tecnologie prevedevano di utilizzare elementi decorativi, ma allo stesso tempo di rivestimento e resistenti al fuoco. Uno dei massimi esponenti della "prima" scuola di Chicago è stato William Le Baron Jenney, la cui idea fu quella di realizzare il grattacielo "First Leiter Building". Fu il primo grattacielo, prima costruito in ghisa e, successivamente, in ferro con uno scheletro modulare. Fu realizzato con la filosofia di ripetere per molte volte in altezza il piano tipo. A differenza delle strutture europee, non era dotato di basamento e coronamento. Inoltre, si iniziò ad intravedere l'idea di edificio interamente finestrato. L'architettura, quindi, cercò di raggiungere sempre di più l'essenzialità e la razionalità.

Due esponenti, invece, della "seconda" scuola di Chicago furono Daniel Burnham e John Root. Essi progettarono il Rookery Building nel 1885 sfruttando l'idea del telaio del First Leiter Building. Inoltre, in questo edificio, fu introdotto un cortile interno per massimizzare la quantità di luce. Root progettò anche The Masonic Temple del 1892, palazzo di 90 m con archi romanici sulla facciata. La particolarità di questo edificio fu legata all'utilizzo di mattoni in facciata che richiese stampi speciali per creare le pareti curve esterne. Già la scuola di Chicago cercò di fronteggiare il problema della forma ottimale del grattacielo, che portarono a ridurre drasticamente gli elementi estetici. In particolare, Root sposava un'idea più essenziale e moderna rispetto a Burnham degli edifici. Questa considerazione fu rispettata anche con l'ampliamento di 10 piani del Reliance Building, ritenuto uno dei più importanti esempi di grattacielo di Root e Burnham.

Un seguace di spiccata importanza nella storia dell'architettura fu Luis Sullivan, considerato il più dotato a livello teorico della scuola di Chicago. Dal suo punto di vista, il grattacielo era il prodotto inevitabile tra aspetti sociali e tecnologici, in cui gli elementi decorativi dovevano separarsi dalle componenti funzionali. Si unì insieme a Dankmar Adler in un famoso studio di architettura. Oltre ad aver progettato l'edificio polifunzionale Auditorium Building di Chicago, si occuparono del grattacielo



Figura 5 Wainwright Building

Wainwright Building. Quest'ultimo, realizzato nel 1891, fu riconosciuto tra i primi edifici alti dotato di elementi estetici, con la sua altezza di circa 41 m e 10 piani. Infatti, alcune colonne non avevano scopo strutturale, ma solo di abbellimento. Il famoso architetto Frank Lloyd Wright definì questo edificio come:

«la prima vera espressione umana di un alto edificio per uffici in acciaio come Architettura.»

1.2.4. New York

Nello stesso periodo in cui Chicago mostrava la crescita dei suoi edifici in altezza, anche New York procedeva nella stessa direzione. Si può dire che si fosse creata una vera e propria gara alla ricerca della massima altezza. La ricerca del record portò, però, alla perdita dell'idea della funzionalità della città; infatti, le strade sembravano sempre più cunicoli con entrambi i lati i muri elevatissimi dei grattacieli. Di conseguenza, la qualità della vita peggiorò a causa dell'aumento di inquinamento e rumore. Per cercare di ovviare a questo problema, a New York, Ernest Flagg propose nel 1898 di lasciare avanzare in strada solo le parti basse dell'edificio, limitando le parti alte ad un quarto della superficie occupata. Questa idea venne ripresa proprio a New York, dal Regional Plan del 1916. I primi effetti si videro con la realizzazione del Verizon Building del 1916, progettato da Ralph Thomas Walker, con un aspetto piramidale che limitava l'ombra sulle strade e aumentava la vivibilità della città. Dopo la grande crisi del 1929, però, si riprese ben presto con l'idea di raggiungere nuovi picchi di altezza, limitando gli aspetti decorativi come il Rockefeller



Figura 6 Empire State Building

Center di Raymond Hood costituito da una configurazione lamellare molto semplice e lineare con fasce finestrate con sviluppo verticale. Fu esempio per molto tempo per la realizzazione di grattacieli creando l'International Stylist, basato su edifici prismatici con elementi strutturali in acciaio. L'espressione culmine di questo stile fu l'Empire State Building a New York realizzato nel 1931 con un'altezza di 375m e 102 piani. Rimase per molti anni il più alto edificio al mondo.

1.2.5. Mies Van der Rohe

Allo stesso tempo, però, era impossibile raggiungere nuovi record di altezza con questa limitazione, perché l'area occupabile dalla parte elevata era limitata. Nacque, così, l'idea dell'arretramento dell'edificio, come proposto da Ludwig Mies Van der Rohe nel Seagram Building nel 1958 in cui l'area di base era occupata da una piazza basamento. Van der Rohe riprese alcune idee della scuola di Chicago mostrando in facciata gli elementi strutturali della facciata auto-portante. Questa particolare tecnica chiamata Curtain Wall era realizzata con una struttura in acciaio rivestita da pannelli di vetro. Si può dire che nacque così una seconda scuola di Chicago. Tra i più iconici edifici c'era sicuramente la Sears Tower realizzata a Chicago nel 1973, attualmente conosciuta come Willis Tower progettata dallo studio Skidmore, Owings & Merrill. Raggiunge il picco di altezza momentaneo con 442 m e fu realizzata seguendo le idee di Mies Van der Rohe.



Figura 7 Sears Tower

1.2.6. New York anni 60-70

Negli anni '60 -'70 si superò l'idea di Mies Van der Rohe con la tendenza della geometrizzazione elementare del prisma per una smaterializzazione volumetrica. Tra gli esempi di spicco, oltre alla Willis Tower, c'è il World Trade Center di Minoru Yamasaki, il complesso delle famose Torri Gemelli con un'altezza di 410 m e 101 piani. Questi edifici superarono il record dell'Empire State Building, ma resistettero per pochi mesi, perché nel 1974 fu eretta la già nominata Sears Tower a Chicago.



Figura 8 World Trade Center

1.2.7. Diffusione in Oriente

Alla fine del XX secolo, il predominio economico si spostò verso l'Oriente, provocando la diffusione dell'idea di grattacielo anche nel resto del mondo. Nel 1992 venne costruito il Central Plaza a Hong Kong con un'altezza di 374 m. Oggi è adibito ad usi uffici sia per importanti aziende che per i Consolati Generale della Svizzera e dell'Italia. Nello stesso periodo, anche in Cina si raggiunsero altezze importanti con gli edifici Shun Hing Square in Shenzhen e CITIC Plaza a Guanzhou, ma solo nel 1997 venne superato il record della Sears Tower. Infatti, nella capitale della Malesia, Kuala Lumpur vennero realizzate le Petrona Twin Towers con un'altezza di 445 m. La geometria della pianta di ogni torre ricorda l'architettura islamica. È costituita da due quadrati sovrapposti a stella e inscritti in un cerchio. Inoltre, le due torri hanno la particolarità di essere collegate con una passerella che unisce gli edifici a 271 m di altezza.

1.2.8. XXI sec. e futuro

Anche negli anni 2000 e successivi, l'Oriente è rimasto il centro di costruzione di grattacieli, fino a raggiungere il tetto del mondo. Tra le più importanti città asiatiche, anche Shanghai si è inserito nella corsa del record. Dopo la Jin Mao Tower del 1998 con un'altezza di 421, il picco fu raggiunto dal World Trade Financial Center con 492 m. La sua costruzione iniziò nel 1998 e terminata nel 2008, anche se fu interrotta una prima volta nel 2003. Infatti, nel progetto furono aggiunti alcuni piani per passare da 94 a 101 piani, che significa da 460 a 492 m. La particolarità dell'edificio è l'apertura trapezoidale in cima che ricorda un "apribottiglie".

La scelta fu sia estetica che funzionale: la creazione di questo enorme foro consente di ridurre la pressione del vento, ma ricorda la rappresentazione cinese del cielo come un cerchio. Il record fu battuto nel 2004, quando venne completato il Taipei 101 che superò i 500 m. La sua forma strutturale estremamente orientale è la pagoda. L'edificio ha due caratteristiche importanti: detenne il record di velocità degli ascensori interni che raggiunsero la velocità di 60.6 km/h e l'introduzione di una nuova tecnologia per bilanciare le azioni del vento (TMD, tuned mass damper, ovvero uno smorzatore di massa).

Il record fu battuto e attualmente ancora mantenuto dal famosissimo Burj Khalifa, grattacielo mastodontico di Dubai che raggiunge 829 m. La pianta dell'edificio più alto del mondo è a forma di Y che consente alla luce di penetrare all'interno attraverso i vetri di rivestimento. A livello strutturale, è sostenuto da un nucleo esagonale centrale che conferisce un'elevata rigidità torsionale della struttura. Le azioni di vento e sisma sono contrastate anche dalle ali di sostegno. È realizzato in calcestruzzo fino all'altezza di 573 m e successivamente in acciaio.

La gara alla ricerca del massimo picco, però, non è terminata e, anzi nei prossimi anni potrebbe raggiungere nuovi orizzonti. Infatti, nel 2013 è iniziata la costruzione della Jeddah Tower, torre situata a Gedda che supererà il chilometro di altezza.

1.2.9. Riassunto dei record

Di seguito viene proposto un riassunto tabellare dei record raggiunti nel corso della storia.

EDIFICIO	ANNO INAUGURAZIONE	ALTEZZA
Empire State Building, New York	1931	375 m
Twin Towers, New York	1973	410 m
Sears Tower, Chicago	1974	435 m
Petronas Twin Towers, Kuala Lumpur	1997	442 m
Taipei 101, Taipei	2004	509 m
Burj Khalifa, Dubai	2010	829 m
Jeddah Tower, Gedda	In costruzione (2027-2028 ?)	1008 m

Tabella 2 Riassunto edifici alti

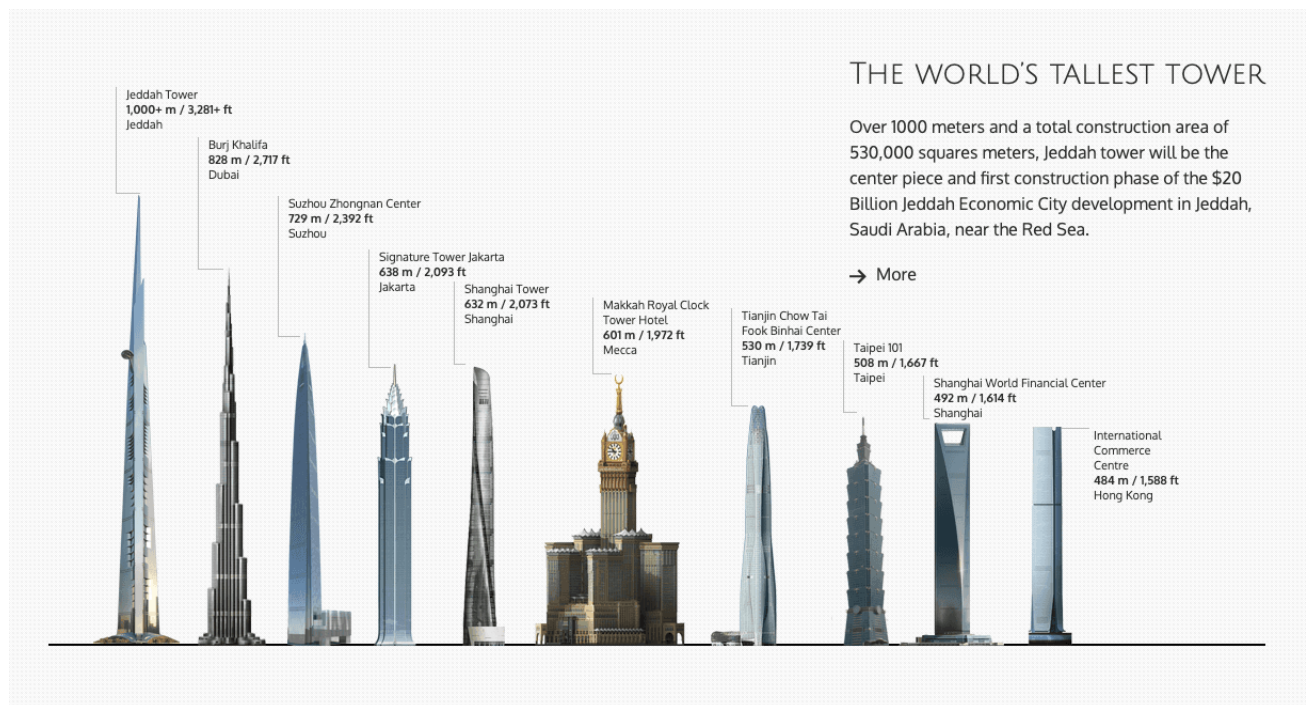


Figura 9 Edifici più alti al mondo

1.3. Sistemi strutturali

Come è stato raccontato nei paragrafi precedenti, l'uomo si è spinto e si spingerà a raggiungere altezze sempre più elevate. L'avanzamento nei record è stato permesso grazie all'evoluzione dei materiali e delle tecnologie. Inoltre, un ruolo sicuramente fondamentale è da attribuirsi alle diverse tecniche strutturali introdotte dagli ingegneri ed architetti nel corso degli anni. Grazie anche all'evoluzione di tecnologie informatiche sempre più avanzate, è stato possibile approfondire lo studio della distribuzione dei carichi all'interno dell'edificio e ottimizzare il materiale necessario. Di seguito, vengono indicate e, brevemente spiegate, le tecniche più famose. Si entrerà nel dettaglio nel capitolo successivo solo per la tipologia "frame" che sarà oggetto di analisi.

1.3.1. *"Struttura a telaio (Frame system)"*

Definita in italiano come struttura a telaio, è una tipologia usata in edifici medio alti e tra le più tipiche fino ai 40 piani. Esse possono variare in base alla scelta delle connessioni tra le colonne e le travi orizzontali. Infatti, si distinguono tra telai a nodi rigidi e telaio a nodi spostabili. Per raggiungere altezze maggiori e contrastare le azioni orizzontali vengono aggiunti i controventi ("bracing system"). Dettagli sul funzionamento vengono presentati nel CAPITOLO 2 - SISTEMA A TELAIO.

1.3.2. *"Setto in cemento con o senza telaio (Concrete shear wall with or without a frame)"*

Un'altra tipologia utilizzata richiede l'inserimento di un cosiddetto "Shear Wall" (letteralmente "Muro di Taglio", ma comunemente chiamato "setto") che consente di aumentare la rigidità dell'edificio. Viene introdotto per limitare gli spostamenti orizzontali sotto l'azione dei carichi orizzontali, assorbendo la maggior parte degli sforzi di taglio sull'edificio. Spesso, contiene al suo interno il sistema degli ascensori o le scale garantendo, quindi, una sorta di "scatola" per gli elevatori protettiva da eventuali incendi. Particolare attenzione va posta alla parte inferiore del setto, in cui gli sforzi sono elevati e in particolare alla zona in trazione. Come ben noto, la resistenza a trazione del calcestruzzo è molto bassa, di conseguenza si potrebbero creare fessure o elevati danneggiamenti. Pertanto, è necessario inserire una grande quantità di armatura proprio in quella zona. In alternativa, si possono progettare muri trasversali all'estremità del muro che permettono di diffondere al meglio le tensioni e aumentare la resistenza torsionale. I solai, invece, sono realizzati o tutti a sbalzo o collegati tra loro attraverso colonne perimetrali sostenute dal solaio inferiore molto rinforzato. Questa seconda tipologia è conosciuta come "a moduli".

Aspetti funzionali, come le porte di accesso ai vani scala o ascensori, però, non consentono di mantenere la continuità del setto, ma richiedono delle aperture. Di conseguenza, i setti sono connessi tra loro con travi di collegamento a breve campata, formando un sistema chiamato “Coupled shear walls”, che tradotto significa “Setti accoppiati”. Per ridurre ulteriormente le deformazioni, ai setti in cemento armato possono essere aggiunti i telai. L’interazione tra setto e telaio, connessi con delle bielle rigide, permette una riduzione degli spostamenti orizzontali. Il setto ha, quindi, la stessa funzione dei controventi. La collaborazione tra le due tipologie di struttura è presentata nella Figura 10. Si può vedere come esista uno scambio di forze che limita le azioni orizzontali. La Figura 10(a) mostra il comportamento a mensola del setto in cemento armato, mentre la Figura 10(b) mostra il comportamento del telaio. La presenza del telaio, inoltre, consente di ridurre il momento agente sul setto, in modo da limitare gli effetti della trazione sul cemento armato.

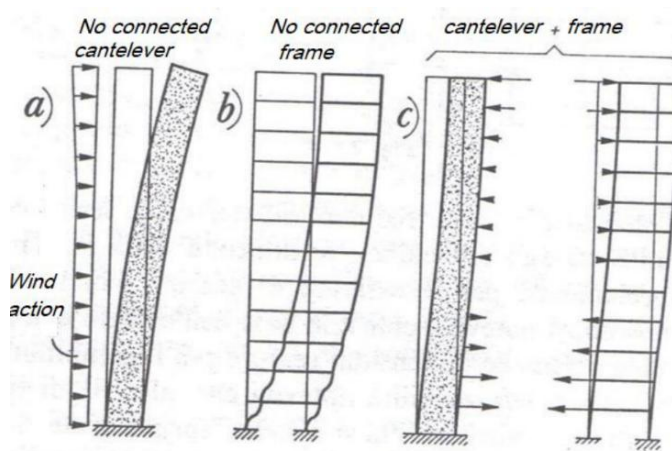


Figura 10 Collaborazione setto-telaio

1.3.3. “Struttura tubolare (Tube structure)”

La Tube structure (o struttura tubolare) è una tipologia molto usata negli edifici alti. Può essere considerata come l’evoluzione del telaio a nodi rigidi introdotta da Fazlur Raham Khan negli anni ’60. Importanti edifici storici degli anni ’70, sono stati realizzati con questa tecnica, come John Hancock Center e Sears Tower con i loro rispettivamente 100 e 110 piani. La struttura tubolare può essere considerata come un corpo rigido, grazie alla rigidità delle connessioni angolari tra le facciate, paragonabile quindi ad un telaio tridimensionale disposto sul perimetro dell’edificio. Infatti, la struttura viene definita in tal modo in quanto è sostenuta da un vero e proprio “tubo” esterno fissato nel terreno. Le strutture tubolari possono essere divise in diverse categorie:

- “A telaio tubolare (frame tube)”: è costituita da una struttura perimetrale di travi e colonne che genera un tubo esterno più rigido delle altre tipologie. La rigidità del tubo è garantita dalla vicinanza tra le colonne che sono collegate tra loro da travi molto spesse. In genere, la spaziatura delle colonne è variabile tra 1,5 m e 4,5 m, mentre le travi possono raggiungere anche spessori di un metro. La rigidità del tubo però è inferiore rispetto a quella del tubo continuo. Si verifica, quindi, il fenomeno noto come shear lag che provoca un aumento delle tensioni nelle colonne laterali dei piani ortogonali all’azione orizzontale rispetto a quelle centrali. Le colonne in direzione parallela al carico sono decisamente meno sollecitate e in alcune le tensioni sono praticamente assenti. La distribuzione dei carichi non è quindi

uniforme tra le colonne a causa della deformazione flessionale delle travi di collegamento e delle colonne. Il corretto funzionamento strutturale a confronto è presente nella Figura 11. Per aumentare la rigidezza e raggiungere altezze sempre maggiori, è possibile introdurre anche un'altra struttura tubolare interna, formando la tipologia chiamata tubo-in-tubo a telaio.

L'esempio probabilmente più famoso di questa tipologia di struttura tubolare è il World Trade Center, le Torri Gemelle.

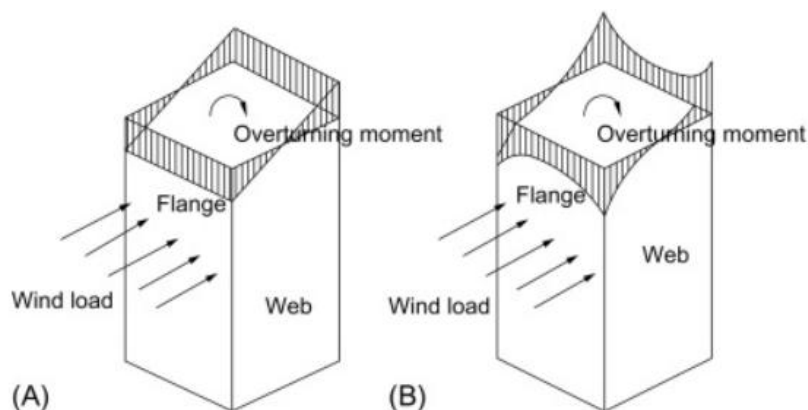


Figura 11 Funzionamento edificio a telaio tubolare

- “*A tubo controventato (braced tube structure)*”: è molto simile alla tipologia tubo in tubo, ma con meno colonne. Per sopperire alla riduzione delle colonne e raggiungere sempre altezze importanti, vengono aggiunti dei controventi in acciaio a X. Quest’ultimi consentono di assorbire maggiormente i carichi orizzontali, riducendo quell’effetto di shear lag descritto in precedenza. Inoltre, ha il grosso vantaggio di ridurre drasticamente i costi, diminuendo il numero di colonne. Dall’altro canto, però, le sezioni in acciaio ingombranti potrebbero ostruire le aperture riducendo l’ingresso della luce e la possibilità di visibilità verso l’esterno. L’esempio più famoso è il John Hancock Center di Chicago.
- “*A tubo in tubo (tube-in-tube)*”: come dice il nome stesso la struttura è un sistema strutturale accoppiato con due tubi, uno esterno ed uno interno. Quello interno, definito come nucleo, può essere sia in calcestruzzo che in acciaio e garantisce maggiore stabilità alla struttura. La collaborazione tra i due “tubi” è garantita grazie alla presenza dei solai considerati come diaframmi. Più raramente, però, sono collegamenti da stabilizzatori. La presenza dei due sistemi connessi consente di assorbire sia le azioni orizzontali che gravitazionali. In particolare, il tubo più esterno assorbe la maggior quantità di carico. Un esempio famoso di questa tipologia di struttura tubolare è la Petronas Tower a Kuala Lumpur, in Malesia.
- “*A tubi accoppiati (bundled tube)*”: il nome stesso della tipologia rimanda all’aspetto della struttura. Prevede l’accoppiamento di edifici tubolari creando un vero e proprio fascio. Questo sistema permette di puntare ad altezze maggiori altrimenti non raggiungibili con altre strutture

tubolari perché le azioni orizzontali dovute a vento e terremoti sono troppo elevate. È stato possibile, così, eliminare i controventi interni, perché i “tubi” perimetrali più bassi fungono da colonne e assorbono le azioni orizzontali. Di conseguenza, viene ridotta la quantità di materiale richiesta. La Willis Tower a Chicago è un esempio importante di questa tecnologia. Nella Figura 12 è possibile vedere ai differenti piani il numero di torri, che variano da 9 a 1.

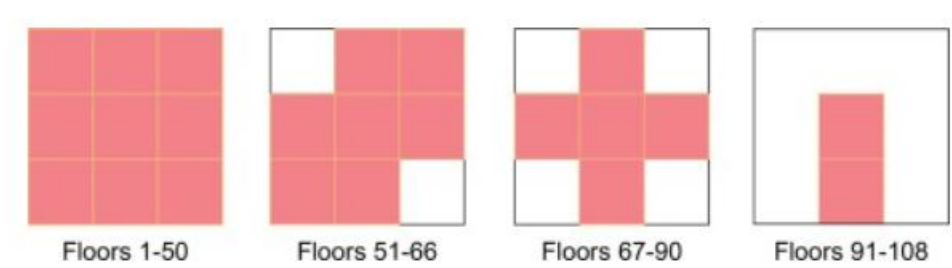


Figura 12 Willis Tower

Nella seguente tabella vengono proposte le immagini relative ai più famosi edifici delle categorie indicate precedentemente.

Frame Tube	Braced Frame	Tube in tube	Bundled Tube
			
World Trade Center	John Hancock Tower	Petronas Tower	Willis Tower
New York (USA)	Chicago (USA)	Kuala Lumpur (Malesia)	Chicago (USA)

Tabella 3 Frame tube, Braced Frame, Tube in tube, Bundle Tube

1.3.4. “Diagrid structure”

Un'altra tipologia strutturale per edifici alti che si sta diffondendo sempre di più è la struttura diagrid. Essa è una particolare tipologia di travatura utilizzata grazie alla sua efficienza strutturale e alla flessibilità nella progettazione. È un sistema di aste inclinate soggette a sforzi di trazione e compressione, senza alcuna componente flessionale presenti sulla superficie esterna. È costituita da una vera propria griglia a maglia triangolare realizzata solitamente in acciaio, mentre molto raramente sono costruite in cemento o in legno.

La progettazione di una struttura diagrid prevede la definizione dell'angolo di inclinazione delle aste che dipende direttamente dall'intramodulo, ovvero dall'altezza dei piani dell'edificio e dal numero di piani contenuti all'interno del triangolo della griglia. Questo è un aspetto molto importante, perché più la maglia è stretta, cioè intramodulo piccolo, più la struttura sarà rigida e, quindi, gli spostamenti saranno minori. Dall'altro canto struttura più rigida significa maggior numero di aste, quindi, maggior materiale e, di conseguenza, maggior costi. La scelta ottimale della configurazione dei diagrid è un processo molto studiato negli articoli, anche con diverse procedure di ottimizzazione. Come molti studi dimostrano, la configurazione ottimale è con un'inclinazione compresa tra i 60° e 70°. Tra le varie opzioni ottimali, inoltre, c'è anche la possibilità di far variare lungo l'altezza l'inclinazione, in genere con intramoduli minori in cima e maggiori in basso. Il vantaggio degli edifici diagrid è che consentono di avere forme particolari, come dimostra ad esempio la Swiss Re Building a Londra, la Tornado Tower a Doha in Qatar o il Capital Gate ad Abu Dhabi.

		
Tornado Tower	Swiss Re Building	Capital Gate
Doha (Qatar)	Londra (UK)	Abu Dhabi (Emirati Arabi Uniti)

Tabella 4 Diagrid

1.3.5. “Stabilizzatori (Outrigger)”

Gli outrigger, definiti in italiano come stabilizzatori, sono dei sistemi che consentono di aumentare la rigidezza e la resistenza alle azioni orizzontali posti lateralmente rispetto alla struttura centrale. È una tipologia introdotta fin dagli anni '80 grazie alla sua flessibilità ed efficienza strutturale. Sono molto efficaci in edifici fino a 150 piani. La struttura è realizzata da un setto centrale e da mega colonne perimetrali come mostrato in Figura 13. La connessione avviene proprio tramite gli stabilizzatori. Come indicato in precedenza anche per altre tipologie, il setto centrale si comporta come una mensola, quindi, incastrata alla base. La struttura perimetrale, invece, si comporta come una struttura a portale. Di conseguenza, l'interazione tra i due sistemi aumenta il rischio di ribaltamento. Per ridurre questo problema, si utilizzano proprio gli stabilizzatori. Questi elementi consentono di ridurre il momento del nucleo centrale alla base, riducendo le azioni di trazione che possono fessurare il calcestruzzo. Quando un edificio alto con stabilizzatori è soggetto all'azione laterale, la forza che colpisce il nucleo centrale viene trasferita al sistema delle mega-colonne centrali. Esistono diversi tipi di stabilizzatori:

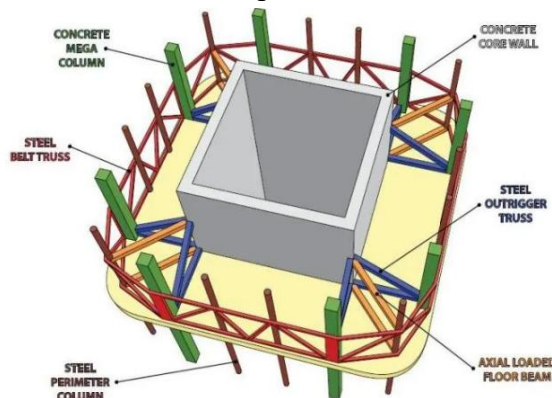


Figura 13 Outrigger Structure

- Sistema convenzionale: corrisponde al sistema sopra descritto in cui avviene la connessione tra setto centrale e sistema perimetrali.
- Sistema di stabilizzatori offset: hanno una disposizione particolare, parallela ad un lato della struttura
- Sistema di stabilizzatori virtuali: non è prevista una vera e propria connessione tra la struttura centrale e esterna. Si utilizzano i piani come diaframmi che trasferiscono il momento dal setto centrale tramite una coppia orizzontale. Un altro sistema sempre virtuale prevede l'utilizzo della “belt truss”, che collega le colonne perimetrali, come mostra la Figura 14.

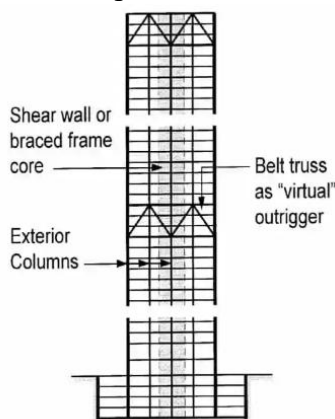


Figura 14 Belt truss

CAPITOLO 2 - SISTEMA A TELAIO

Il sistema a telaio, in inglese Frame System, è una tipologia molto utilizzata per edifici di media e grande altezza. Questa tecnologia è la prima ad essere stata utilizzata per gli edifici, perché concettualmente semplice ed efficiente. La limitazione in altezza, però, ha portato a sviluppare le altre tecnologie.

La struttura a telaio è costituita da sistemi di colonne e travi che compongono i singoli telai, disposti ortogonalmente tra loro in modo da formare un telaio spaziale. L'insieme di membratura deve essere concepita capaci di resistere contemporaneamente sia ad azioni assiali sia ad azioni flettenti e taglianti. Le connessioni tra le colonne e le travi influenzano fortemente il comportamento complessivo della struttura. In aggiunta, si possono inserire i controventi perimetrali per aumentare la rigidezza e assorbire al meglio i carichi laterali. In altri casi, invece, il telaio collabora direttamente con il setto centrale formando la struttura che in precedenza è stata definita come "Shear walls with frame".

In genere queste strutture sono realizzate in acciaio, per sfruttare la sua ottima resistenza sia in compressione che in trazione, ponendo particolare attenzione all'instabilità. Raramente viene utilizzato il calcestruzzo armato, mentre stanno prendendo sempre più piede le strutture a telaio in legno, anche per i grandi edifici. Il legno, oltre a sposare il concetto di sostenibilità che ormai ricorre quotidianamente nelle nostre vite, vanta anche una buona resistenza e un impatto ambientale ridotto.

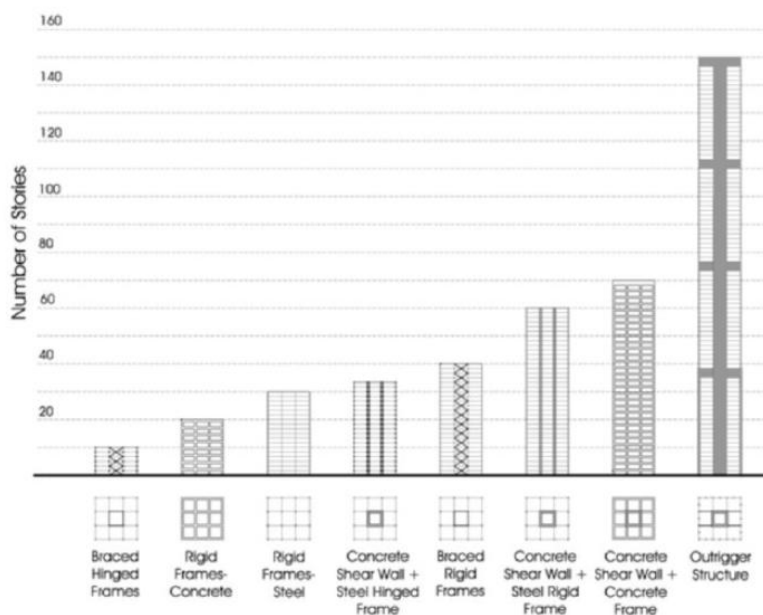


Figura 15 Massime altezze per edifici a telaio

Le strutture a telaio hanno il grosso vantaggio di essere semplici da progettare e, avendo geometrie lineari, anche veloci da costruire. Inoltre, hanno una buona resistenza alle vibrazioni sia sismiche che per utilizzo industriale. Sono, anche, rigidi e stabili, ma non consentono di raggiungere altezze molto

elevate. La Figura 15 mette a confronto le diverse tipologie di strutture frame variando il materiale, le connessioni e la presenza di controventi o setti in cemento armato.

Un capitolo a parte è riservato per la struttura frame, che viene analizzato più nel dettaglio, perchè oggetto di ottimizzazione in questa tesi.

2.1. Telaio

Come detto in precedenza, un sistema a telaio è costituito da membrature verticali (le colonne) e orizzontali (le travi) connessi tra loro. I carichi agenti sui solai vengono trasferiti sulle travi e successivamente divise tra le colonne che li trasmettono alle fondazioni e, di conseguenza al terreno. Il percorso dei carichi può essere riassunto come solaio-trave, trave-colonna e colonna-fondazione. La scelta dei giunti influenza fortemente la progettazione della struttura, in particolari sulla trasmissione dei momenti e sulla deformazione dell'edificio. Risulta, quindi, essere un punto cruciale nel processo di design. La struttura può variare da isostatica, in cui le connessioni sono delle cerniere che trasferiscono solo gli sforzi assiali, a iperstatica in cui sono presenti delle connessioni rigide. L'EN 1993-1-1, nella *parte 1-8*, riporta la classificazione dei giunti tra travi e colonne, e giunti di base. Essa è strettamente collegata alla relazione tra la rigidezza rotazionale e capacità resistente a flessione; dipende, quindi, dalla relazione momento-rotazione. La normativa associa la corretta definizione nel seguente modo:

$$\text{Giunti rigidi} \quad S_{j,ini} \geq \frac{k_b EI_b}{L_b} \quad (1)$$

$$\text{Giunti semi-rigidi} \quad \frac{0.5 EI_b}{L_b} < S_{j,ini} < \frac{k_b EI_b}{L_b} \quad (2)$$

$$\text{Cerniere} \quad S_{j,ini} \leq \frac{0.5 EI_b}{L_b} \quad (3)$$

Dove:

- $S_{j,ini}$ è la rigidezza rotazionale;
- E è il modulo elastico;
- I_b è il momento di inerzia;
- k_b è pari a 8 per telai controventati e 25 per telai non controventati;
- L_b è la luce della trave collegata.

La descrizione può essere rappresentata come nella Figura 16. Viene messo in relazione, la rotazione e il massimo momento flettente. Le zone sono così definite:

- Zona 1 = giunti rigidi
- Zona 2 = giunti semi-rigidi
- Zona 3 = giunti cerniera

È possibile notare come nel caso dei giunti rigidi la resistenza flessionale deve essere elevata, consentendo poca rotazione. Esattamente il contrario nelle cerniere.

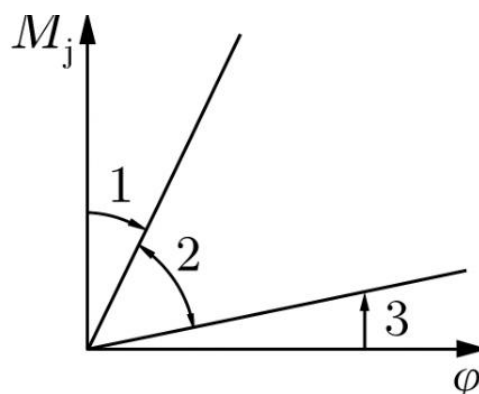


Figura 16 Grafico momento-curvatura

Un altro aspetto importante riguarda la stabilità del telaio. Essa dipende dai vincoli presenti. Si distinguono, quindi, telaio a nodi fissi e telaio a nodi spostabili. Come dice il nome stesso, la prima tipologia è vincolato nei confronti degli spostamenti trasversali, mentre la seconda consente la traslazione. La scelta dei giunti sia di esterni che interni influenza la cosiddetta lunghezza libera di inflessione. Essa è definita “come la distanza tra due punti consecutivi di flesso della deformata critica in campo elastico”. È fondamentale per calcolare la snellezza equivalente, parametro fondamentale nella progettazione della struttura.

La scelta dei giunti, quindi, è cruciale. La progettazione cambia, varia lo spostamento massimo e, quindi, l'altezza raggiungibile per rispettare i limiti è differente nelle diverse tipologie.

2.1.1. Telaio pendolare (con cerniere)

Tra le opzioni possibili in figura risulta esserci anche la soluzione con i nodi incernierati. La struttura è capace di resistere agli effetti sia dei carichi verticali che dei carichi orizzontali ripartendo le azioni tra le membrature. È possibile dividere la struttura in due componenti: la componente telaio e la componente controvento. In assenza di imperfezioni, come ad esempio i fuori-piombo che considerano la non perfetta verticalità delle colonne, la componente telaio con cerniere come connessioni è in grado di resistere ai carichi verticali. Non è però in grado di resistere alle sollecitazioni orizzontali, in quanto risulta ipostatica. Tutte le travi e colonne hanno la possibilità di ruotare relativamente tra di loro e non presentano alcun contrasto alla traslazione orizzontale. È necessario, quindi, introdurre un sistema di controventi. Quest'ultimi possono essere schematizzati come una mensola aggettante nel terreno. Essi sono collegati ai nodi con delle cerniere in modo che gli spostamenti della componente telaio sono uguali a quelli della componente controvento. La collaborazione è riassunta nella Figura 17:

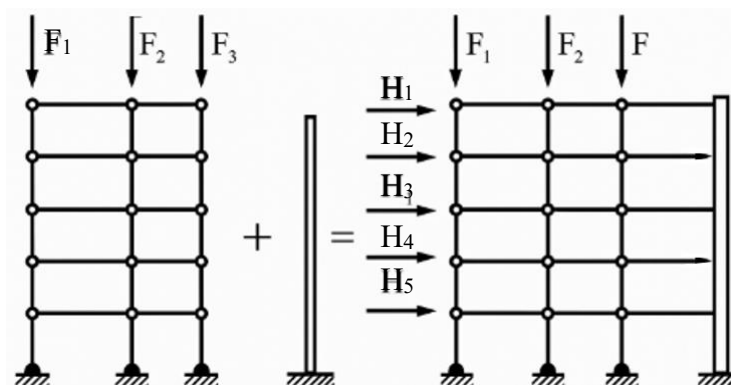


Figura 17 Collaborazione telaio+controvento

La somma delle due componenti risulta essere, quindi, una struttura isostatica in grado di resistere ad entrambi le sollecitazioni.

Le connessioni usate per creare nodi incernierate, in genere, sono ottenute con piastre saldate alla colonna e imbullonata alla trave. Un altro esempio potrebbe essere l'applicazione di elementi angolari imbullonati alla trave. In tutti i casi, la connessione è progettata per non trasmettere né momento né taglio, ma solo sforzo normale.

2.1.2. Telaio a nodi rigidi e semi-rigidi

Oltre alle cerniere, è possibile realizzare le connessioni come rigide o semi-rigide, ovvero incastri rigidi interni alla struttura. Questa tipologia è identificata in inglese come Moment Resisting Frame, MRF. Le travi e le colonne devono essere in grado di resistere a sforzo normale, momento flettente e taglio. In un sistema del tipo sopra descritto, il diagramma dei momenti dovuto ai carichi verticali è parabolico sulle travi, mentre lineare lungo le colonne. Nel caso di carichi orizzontali, invece, l'andamento è totalmente lineare, con valori elevati all'estremità della membratura e, in particolare, nei primi piani. Le connessioni rigide, però, consentono di ridurre il momento agente sulle travi derivante dai carichi verticali. Infatti, presa la singola trave essa risulta incastrata agli estremi e, come ben noto, il momento massimo risulta minore rispetto al massimo nel caso di trave incernierata. Ai fini della progettazione può risultare un aspetto determinante.

Gli elementi della struttura, quando soggetti a carico orizzontale, risultano soggetti a sforzo normale, taglio e momento che porta ad una deformazione, come somma di varie deformate. Le deformate citate sono quella derivata dagli sforzi assiali e quella della componente tagliante. Esse prendono, quindi, il nome di flessionale e tagliante. La prima delle due è dovuta agli sforzi normali delle colonne della struttura. Si può riscontrare trazione sul lato su cui viene applicata la forza e compressione sull'altro lato. Di conseguenza, si verifica un allungamento dei pilastri nella prima zona descritta e un accorciamento nella seconda con una conseguente deformazione. In genere, per ridurre al minimo questi effetti che richiedono costi elevati, si cerca di incrementare la forza di compensazione derivante

dal carico permanente. La deformazione delle forze assiali dipende dalla rigidità assiale degli elementi e prende il nome di componente piastra. Dall'altra parte, la deformata derivante dall'azione tagliante è determinata senza considerare lo sforzo assiale ed è dovuta alla flessione delle colonne e delle travi. A differenza del caso precedente in cui si vede una rotazione degli elementi orizzontali, innalzando da un lato e abbassando dall'altro i nodi, nella deformata tagliante le connessioni trave-colonna rimangono sostanzialmente allo stesso livello. La Figura 18 proposta mette in luce le due deformate affiancate. Il comportamento può essere paragonato a quello di una trave prismatica incastrata, anche se predomina quella flessionale a quella tagliante (Figura 19).

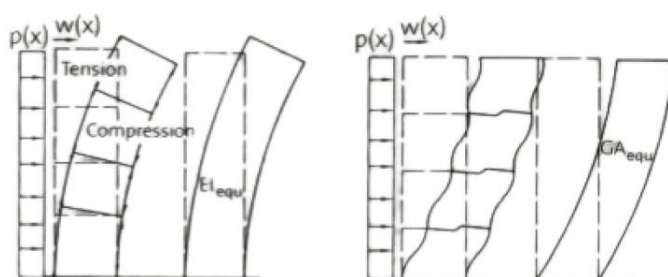


Figura 18 Deformata telaio flessionale e tagliante

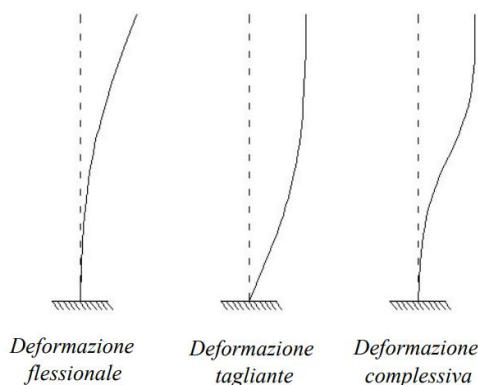


Figura 19 Deformata mensola tagliante e flessionale

Un aspetto importante, però, riguarda la trasmissione del momento al nodo. In quel punto, il momento è il maggiore. Specialmente nel caso di sisma, è importante che non avvenga la rottura della connessione, ma la plasticizzazione dell'estremità della trave. Infatti, gli MRF sono progettati per dissipare l'energia con la creazione di cerniere plastiche proprio sulle travi. Si parla di un meccanismo “trave debole-colonna forte” che prevede la formazione di cerniere plastiche anche alla base delle colonne del primo piano. Questo sistema è quello che fornisce la maggior duttilità. Per ottenere il comportamento sopra descritto, in genere si riduce la sezione della trave all'estremità, rendendolo come punto debole e preservando l'integrità della colonna e del nodo. Questa tecnologia è definita come RBS, reduced beam section.

Esistono molte tipologie di connessioni rigide tra travi e colonne. Parlando di telaio in acciaio, possono essere sia bullonate che saldate. In genere, vengono introdotti dei piatti di irrigidimento per incrementare la resistenza del nodo. Nel caso di zone con livello di sismicità basso che non richiedono un sistema dissipativo vengono usate altre configurazioni più semplici e meno costose.

2.2. Controventi

Le strutture a telaio non resistono in modo ottimale alle azioni orizzontali. In particolare, le strutture incernierate non sono in grado di resistere alle traslazioni. Il telaio a nodi rigidi, invece, ha la capacità di resistere alle azioni, ma, come detto in precedenza, resistono prevalentemente grazie alla rigidità flessionale. Per soddisfare le limitazioni degli spostamenti, però, viene richiesto una grande quantità di materiale. In entrambi i casi, si preferisce usare i cosiddetti controventi. Il sistema telaio con i controventi prende il nome di telaio controventato, in inglese Braced Frame. Un controvento può essere definito come una trave reticolare verticale in cui le colonne si oppongono al momento ribaltante e le diagonali assorbono lo sforzo tagliente sotto forma di sforzo normale. La deformata risulta quindi essere la somma del comportamento di tipo flessionale derivante dalle sollecitazioni nelle colonne e di tipo tagliente causato dagli sforzi nei controventi (Figura 20).

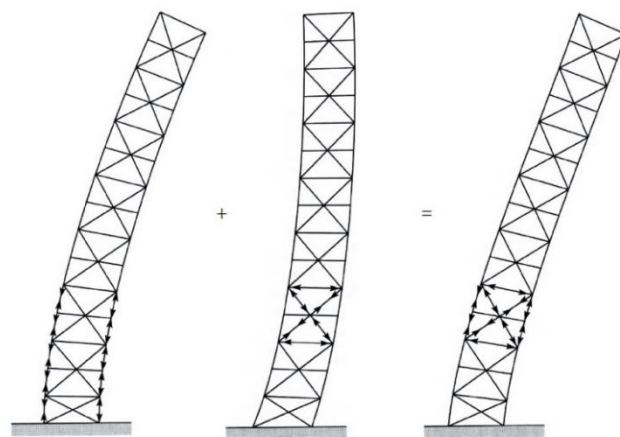


Figura 20 Funzionamento controventi

La progettazione di una struttura a telaio prevede la scelta della tipologia di controvento, la sua posizione e il suo dimensionamento. Inoltre, anche le connessioni tra controvento, colonna e trave sono fondamentali.

I controventi si dividono in due grandi famiglie:

- Concentrici
- Eccentrici

La differenza riguarda il congiungimento della linea d'asse delle aste: se convergono nello stesso punto sono chiamati concentrici, altrimenti eccentrici. In genere, la scelta ricade su quelli concentrici, ma, qualora non fosse possibile creare il nodo, si preferisce la soluzione eccentrica. Quest'ultima, però, crea stress aggiuntivi che devono essere considerati nei calcoli. Di seguito verranno approfonditi nel dettaglio. All'interno di queste due grandi categorie esistono diversi tipi: a croce di sant'Andrea (X), a V, a V rovesciata, a K e tanti altri.

2.2.1. Concentrici

La prima famiglia analizzata è quella dei controventi concentrici, da cui deriva il nome CBF, Concentrically Braced Frames in inglese. Questa risulta essere la tecnologia più utilizzata, perché riduce le sollecitazioni sugli elementi orizzontali e verticali del telaio. Un controvento risulta essere concentrico quando le linee d'asse delle aste si incontrano in un unico punto. In generale, questa tipologia di controvento ha le diagonali che convergono o in nodi trave-pilastro o in punti interni di travi o pilastri. Esse sono soggette prevalentemente a sforzo normale, con solo il momento derivante dal loro peso proprio che risulta, comunque, piccolo. La connessione tra controventi e gli altri elementi della struttura sono, quindi, delle cerniere. Inoltre, la presenza delle diagonali non obbliga a creare un MRF, ma è sufficiente anche un sistema pendolare. Solitamente, però, la presenza della connessione con la diagonale incrementa la rigidità del nodo trave-colonna.

Il ruolo delle diagonali è fondamentale anche nella dissipazione dell'energia nel caso di terremoto. Infatti, la dissipazione è affidata ad esse, soprattutto agli elementi in trazione, che si plasticizzano, superando la resistenza elastica. Risulta, invece, meno importante quella a compressione. Per ottenere questo obiettivo, gli altri elementi devono mantenersi in campo elastico. Bisogna tenere in conto, però, l'instabilizzazione dell'acciaio in compressione. Infatti, nel caso di sollecitazione ciclica, la risposta è influenzata dalla perdita di capacità dissipativa a causa, proprio, dell'instabilità dell'asta compressa. Ripercorrendo in breve la risposta ciclica inelastica, l'asta soggetta a compressione rimane in campo elastico fino al carico massimo concesso. Successivamente, si verifica il fenomeno di instabilità che porta ad uno spostamento del punto centrale della sezione ancora in campo elastico. Nasce, però, un momento flettente che è massimo in mezzzeria e superata la resistenza a flessione porta creazione di una cerniera plastica. Con l'inversione di carico, l'asta è soggetta ad una fase di scarico e recupera la componente elastica. Rimane pertanto la componente plastica non recuperata che riduce la resistenza flessionale della diagonale. Questo comportamento è fortemente influenzato dalla snellezza globale. Infatti, qualora fosse troppo piccola la sezione rispetto alla lunghezza dell'asta si avrebbe un'accelerazione del fenomeno, che risulta limitato nel caso di sezioni tozze. Il progetto della sezione risulta, quindi, essere una parte cruciale della progettazione ai fini di limitare fenomeni di degrado.

In letteratura esistono diverse tipologie di controventi concentrici e la scelta corretta consente di ridurre costi e massa della struttura. Le geometrie più comuni sono a croce di Sant'Andrea (X), a V, a V rovescia, diagonale, a K, a croce su più piani, a zipper e tante altre. Le loro configurazioni sono presentate di seguito:

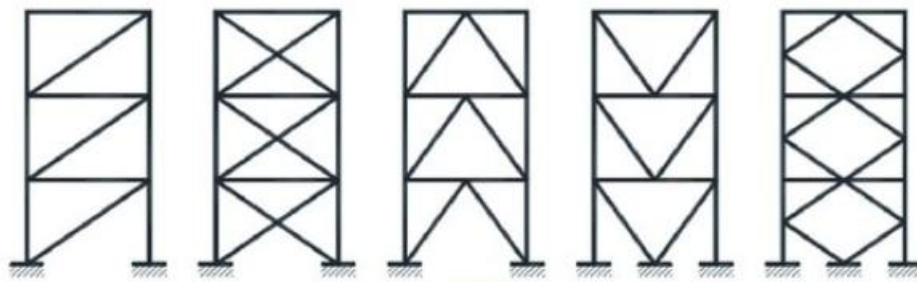


Figura 21 Tipologie controventi

La normativa NTC 2018, §7.5.2.1 riconosce 3 tipologie di controventi che verranno descritti di seguito:

- Controventi con diagonale tesa attiva;
- Controventi a V;
- Controventi a K.

La progettazione della connessione tra controvento e struttura è un aspetto importante. Nel caso sistemi concentrici, i collegamenti possibili sono 3:

- diagonale-trave-colonna;
- diagonale-trave;
- diagonale-diagonale;

Non tutte le configurazioni di controventi presentano contemporaneamente le tre tipologie di collegamenti. Ad esempio, la connessione diagonale-trave è presente solo nei sistemi a V e V rovescia, mentre quella diagonale-diagonale nel caso di controvento a X. Molto spesso appare la prima tipologia. Questa viene progettata in modo da essere più resistente rispetto all'asta. Per ottenere questo risultato, la normativa NTC 2018, §7.5.3.1 prevede di utilizzare la relazione:

$$R_{j,d} \geq 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot R_{pl,Rd} = R_{U,Rd} \quad (4)$$

Dove:

- $R_{j,d}$ è la capacità di progetto del collegamento;
- $R_{pl,Rd}$ è la capacità al limite plastico della membratura dissipativa collegata;
- $R_{U,Rd}$ è il limite superiore della capacità della membratura collegata.

Solitamente, si preferisce usare dei fazzoletti opportunamente progettati in modo da favorire l'instabilità della diagonale prima della connessione. Questo obiettivo viene raggiunto disegnando il collegamento al fine di creare una linea di snervamento ortogonale alla linea d'asse dell'asta. Qualora

si creasse una linea di snervamento che interseca il solaio è meglio introdurre materiale come il polistirolo altamente comprimibili per isolare strutturalmente la connessione dal solaio.

La connessione diagonale-trave tipica dei sistemi di controventi a V rovesciata è progettata allo stesso modo della precedente. Bisogna, però, introdurre dei piatti di irrigidimento al fine di evitare l'instabilità fuori dal piano.

Infine, l'ultimo tipo di collegamento è tipico dei sistemi a X, ma non sempre è presente. A seconda della rigidezza del nodo è possibile considerare le due aste connesse oppure no. Nella progettazione, questo influenza la lunghezza libera di inflessione.

2.2.1.1. Controventi a diagonale tesa attiva

La normativa definisce questa tipologia come:

“la resistenza alle forze orizzontali e le capacità dissipative sono affidate alle aste diagonali soggette a trazione”.

L'esempio più comune è il controvento a croce di Sant'Andreas, o anche definito a X. Essi funzionano al meglio quando entrambe le diagonali lavorano in trazione. L'applicazione di una forza laterale, però, porta ad un'asta in trazione che assorbe il carico, mentre l'altra si rilassa. Quest'ultima non contribuisce ad aumentare la resistenza e viene considerata come non collaborante. Al fine di tenere entrambi le diagonali attive, si può procedere con un pretensionamento. In questo modo, anche l'asta non collaborante sarà soggetta a trazione e, quindi, partecipa attivamente. La rigidezza totale della struttura aumenta, anche se viene introdotta una compressione aggiuntiva su travi e colonne. Questo sistema, però, non è ottimale nel caso di carichi dinamici che cambiano spesso direzione, come il terremoto. L'incremento repentino di carico porta ad uno stress eccessivo sull'asta in precedenza scarica. Si preferisce, in genere, mantenere le aste non pretese e non collaboranti in contemporanea. Si progettano come se solo una delle due fosse presenti, in quanto la diagonale compressa è soggetto a fenomeni instabili. Questa idea è maggiormente veritiera nel caso di aste snelle e in campo non lineare. Nella realtà, però, anche l'asta compressa comunque ha un suo ruolo, che nel caso di travi tozze non è trascurabile, per evitare costi eccessivi per sovradimensionamento. La scelta di trascurare un'asta risulta comunque a favore di sicurezza. In letteratura, molti esperimenti hanno dimostrato che il comportamento del controvento a X è caratterizzato da tre fasi diverse:

- Fase 1: entrambe le aste collaborano;
- Fase 2: l'asta in compressione si instabilizza;
- Fase 3: l'asta in trazione si snerva;

In questo modo, l'energia viene dissipata con la plasticizzazione delle aste dei controventi, mentre le colonne e le travi rimangono in campo elastico. Il comportamento viene riassunto nella Figura 22.

Un aspetto importante riguarda la connessione tra le due aste. Questo influenza il comportamento del controvento sotto carichi dinamici. Infatti, varia la lunghezza libera di inflessione, ovvero la distanza tra due punti di flesso della trave che determina i modi instabili dell'asta compressa. Le due aste possono essere mutualmente saldate, creando un vincolo interno oppure collegate non rigidamente in modo da far perdere l'efficacia del vincolo.

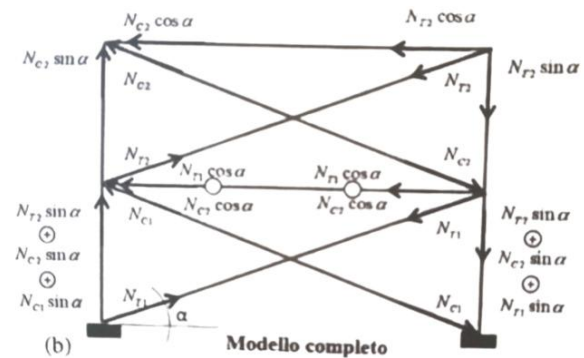


Figura 22 Forze nelle aste

Questo sistema è spesso usato negli edifici alti ed è molto efficace, ma la configurazione geometrica non consente di inserire aperture in quanto le due aste lo impediscono.

A volte si propone la presenza di un'unica asta di connessione. Il controvento si comporta in modo diverso a seconda della configurazione dei carichi. È efficace nel caso in cui la trave risulti tesa. In compressione, si verifica il solito problema di instabilità, qualora il carico fosse troppo elevato. Per ovviare a questo problema, si può procedere con il sistema a X, oppure facendo variare la direzione di inclinazione dell'asta per ogni piano in altezza. Quest'ultimo sistema, però, può provocare alternanza di piani più o meno rigidi dovuti alla possibilità di non collaborazione dei piani in compressione. In alternativa, si possono usare aste singole, ma applicate in entrambe le direzioni allo stesso piano, cioè un modulo con l'asta inclinata verso destra e uno verso sinistra.

2.2.1.2. Controventi a V

I controventi a V e V rovescia sono un'altra categoria spesso usata, che a differenza della precedente consente di introdurre aperture come porte e finestre. La normativa definisce questa categoria nel seguente modo:

“Le forze orizzontali devono essere assorbite considerando sia le diagonali tese che quelle compresse. Il punto d'intersezione di queste diagonali giace su di una membratura orizzontale che deve essere continua”.

Queste strutture hanno la particolarità di avere l'intersezione delle diagonali posta a metà della trave orizzontale, senza, però, dividerla. La connessione risulta, quindi, essere una cerniera in modo da non generare momento tra le due aste. Quando si applica una forza orizzontale, il controvento si assorbe tutto il carico; una diagonale sarà in compressione e una in trazione. In campo elastico, le due aste saranno soggette a carico uguale, che non genera, quindi, una reazione sulla trave orizzontale. Di

conseguenza non sarà soggetto ad uno sforzo verticale che avrebbe provocato un momento flettente. Come ben noto, però, l'acciaio è soggetto ad instabilità in compressione. Qualora il carico fosse troppo elevato, il fenomeno potrebbe verificarsi. In caso di instabilità, l'asta compressa riduce il contributo alla rigidezza laterale. Il carico assorbito sarà minore e pertanto nascerà una reazione di equilibrio nell'asta orizzontale. La trave è, quindi, soggetta ad una forza verticale concentrata che genera momento con un incremento delle sollecitazioni flessionali. Durante la progettazione è necessario garantire un'elevata rigidezza flessionale della trave e aumentare il più possibile il carico a cui avviene l'instabilità. Se si dovesse verificare una cerniera plastica nel punto di connessione, si avrebbe una riduzione di rigidezza e un abbassamento della trave che provoca l'allungamento della diagonale tesa e l'accorciamento della diagonale compressa.

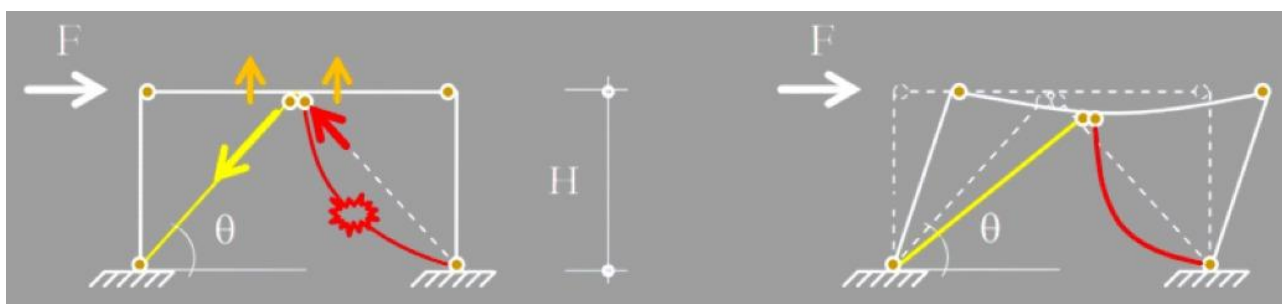


Figura 23 Funzionamento controvento a V rovesciata

Vista la complessità e l'imprevedibilità del sistema è necessario progettare il controvento a dovere. A differenza del caso precedente, l'asta deve essere considerata per vedere l'evoluzione del carico sulla trave orizzontale. Inoltre, l'elemento orizzontale, sia in caso di MRF che sistema pendolare deve essere progettata per resistere all'applicazione del momento.

2.2.1.3. Controventi a K

I controventi a K sono un sistema che viene usato meno spesso rispetto ai precedenti. È costituito da aste diagonali che hanno una connessione sia a metà colonna che con la trave superiore e inferiore. Come in precedenza, non si spezza l'elemento del telaio, ma si mantiene la sua continuità e si posiziona una cerniera per collegare il controvento. Ne esistono diverse configurazioni: la figura mostra la tipologia in cui il controvento ha le connessioni sia a metà delle colonne che delle travi. Altri esempi posizionano l'intersezione tra le aste solo su una colonna e collegano le colonne con l'intersezione tra la trave e colonna dal lato opposto. Questo può essere fatto in una direzione o nell'altra, oppure in modo simmetrico della struttura per garantire, comunque, lo stesso comportamento in entrambe le direzioni.

Questo sistema ha un grosso problema che non lo rende utilizzabile in zona sismica. Infatti, la presenza della connessione in mezzo alla colonna può generare una forza orizzontale applicata sull'elemento verticale. La reazione genera un carico concentrato che provoca momento su di esso e,

se eccessivo, il collasso di essa e, quindi, della struttura. È necessario garantire una buona resistenza a flessione dei pilastri.

2.2.1.4. Altre tipologie

In letteratura sono presenti diverse tipologie di controventi, da forme più semplici a più complesse. Ognuna di queste cerca di ovviare ai problemi di altri sistemi, ma crea altri svantaggi. Ad esempio, per soddisfare il problema che potrebbe insorgere nel caso di controventi a V e a V rovescia, si può inserire la croce di Sant'Andrea su due piani oppure il sistema a zipper. Il primo è costituito da un alternarsi di sistemi a V e a V rovesciata. In questo modo, si riduce la sollecitazione flessionale sull'elemento orizzontale. Il sistema zipper, invece, oltre al controvento a V rovescia presenta anche un pendolo verticale. Esso collega la connessione tra le diagonali e la trave al piano di sotto in verticale. In questo modo, si trasferisce la componente verticale risultante dalle diagonali al piano superiore.

Le tipologie presentate nei paragrafi precedenti sono le più utilizzate e pertanto verranno utilizzate nella fase di ottimizzazione dell'elaborato. Ne esistono diverse altre e sicuramente in futuro se ne svilupperanno ancora che consentono di ottimizzare al meglio la massa e limitare gli spostamenti.

2.2.2. Eccentrici

Un'altra grande famiglia dei controventi risulta essere quella relativa ai controventi eccentrici. Definiti in inglese come *eccentrically braced frames (EBF)*, sono quei sistemi in cui le linee d'asse delle diagonali non convergono in uno stesso punto. Nascono così dei conci, solitamente sulla trave, denominati come "link" o "elementi di connessione", che hanno il compito di dissipare l'energia derivante dai carichi orizzontali, plasticizzandosi. In base alla lunghezza del concio chiamata solitamente "e", si possono avere deformazioni plastiche cicliche e/o flessionali: un elemento di connessione corto si plasticizza sotto l'effetto del taglio, mentre un elemento lungo sotto l'effetto flessionale. La normativa NTC 2018, §7.5.6 definisce le categorie nel seguente modo:

$$\text{"corti"} \quad e \leq 0,8(1 + \alpha) \frac{M_{l,Rd}}{V_{l,Rd}} \quad (5)$$

$$\text{"intermedi"} \quad 0,8(1 + \alpha) \frac{M_{l,Rd}}{V_{l,Rd}} < e < 1,5(1 + \alpha) \frac{M_{l,Rd}}{V_{l,Rd}} \quad (6)$$

$$\text{"lunghi"} \quad e \geq 1,5(1 + \alpha) \frac{M_{l,Rd}}{V_{l,Rd}} \quad (7)$$

In cui:

- $M_{l,Rd}$ è la capacità flessionale del link;
- $V_{l,Rd}$ è la capacità a taglio del link;
- α è il rapporto tra il valore minore ed il maggiore della domanda a flessione attesa alle due estremità dell'elemento di connessione.

La progettazione deve concentrarsi sul garantire una sovreresistenza agli altri elementi del sistema, travi, colonne e diagonali per farli lavorare in campo elastico, in modo da concentrare lo stress sul link. Così facendo, si ottiene il comportamento duttile.

Anche in questo caso esistono diverse tipologie:

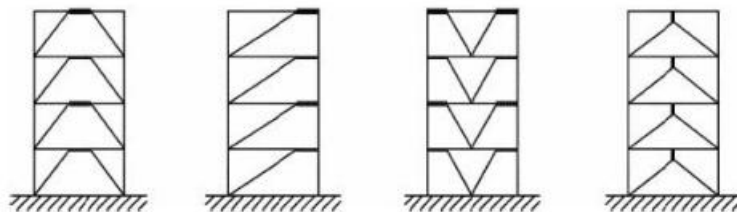


Figura 24 Tipologie controventi eccentrici

Come mostra la Figura 24, si possono avere link orizzontali e verticali, che, quindi, appartengono alle travi oppure no. In ogni caso, è necessario che il link abbia un'adeguata capacità rotazionale. Per ovviare a questo problema, il link deve essere dotato di elementi irrigidenti per evitare l'instabilità fuori dal piano che precluderebbe la duttilità. Come riporta la normativa NTC2018, §7.5.6:

“negli elementi di collegamento intermedi e corti devono essere evitati i fenomeni di instabilità locale fino al raggiungimento della completa plasticizzazione della sezione”.

Inoltre, aggiunge che:

“la domanda di rotazione rigida θ_p tra l'elemento di connessione e l'elemento contiguo non deve eccedere i seguenti valori:

$$\text{elementi corti: } \theta_p \leq 0.08 \text{ rad}$$

$$\text{elementi lunghi: } \theta_p \leq 0.02 \text{ rad}$$

Per gli elementi di connessione «intermedi» si interpola linearmente tra i valori precedenti.”

Per far in modo che il sistema funzioni nel modo corretto, la progettazione dei collegamenti è fondamentale. Oltre ai sistemi proposti in precedenza per i controventi concentrici, in questo caso sono di particolare importanza le connessioni tra il link e gli altri elementi. La connessione tra trave

dov'è presente il link e diagonale può essere sia continua che semicontinua. Il primo caso prevede una saldatura a completa penetrazione, mentre il secondo la diagonale viene collegata con un fazzoletto irrigidito per evitare problemi di instabilità. Questo secondo sistema consente rotazioni relative tra link e diagonale perché meno rigido. Cruciale, invece, è la connessione tra link e colonna. Bisogna evitare che si verifichino deformazioni plastiche nel collegamento che potrebbe ridurre il comportamento duttile. Solitamente si procede introducendo dei piatti di rinforzo nella trave per aumentare la resistenza a taglio e flessione.

2.2.2.1. Tipologie

Come detto in precedenza, anche in questo caso esistono diverse configurazioni possibili e ognuna di esse ha delle peculiarità.

La prima disposizione è indicata solitamente come tipologia a K ed è dotata di un link sulla trave orizzontale che è connesso con due aste diagonali. All'altra estremità, le due diagonali sono incernierate con il sistema trave colonna. In questo caso, l'elemento di connessione è parte della trave e non presenta collegamenti all'estremità. Lo svantaggio del sistema descritto richiede lunghezze elevate della campata controventata.

La seconda configurazione, invece, è nota come sistema a D. Ricorda il sistema concentrico ad una singola diagonale, ma l'asta non connette da una parte all'altra i collegamenti trave colonna; è presente un'eccentricità. Il collegamento del link con la colonna è il punto debole nel meccanismo resistente. L'altro svantaggio di questo sistema è la presenza di sforzo normale nel link. A differenza della tipologia precedente, però, non sono richieste grandi campate controventate.

La terza configurazione, invece, è simile alla configurazione a V dei controventi concentrici e per questo assumono il nome di controventi eccentrici a V. Anche in questo caso le due aste diagonali non raggiungono i punti di estremità della trave, ma creano degli elementi di connessione.

L'ultima tipologia, infine, presenta un link verticale e non è parte integrante della trave. La sua forma ricorda una "Y" rovesciata, che gli conferisce il nome. Questo sistema ricorda la configurazione a V rovesciata, ma con l'elemento di connessione in grado di plasticizzarsi.

Una tipologia particolare, invece, riguarda quella dei link rimovibili. In questo caso, l'elemento di connessione è bullonato alla trave di piano. I due sistemi, quindi, sono allo stesso tempo separati ma collaboranti. L'introduzione dei bulloni consente di rimuovere il link nel momento in cui sia eccessivamente ammalorato, inserendone uno nuovo e performante. Il telaio è visto, quindi, come sistema ricentrante rimanendo in campo elastico e consente le operazioni di smontaggio e rimontaggio.

2.2.2.2. Funzionamento del link

Il link assorbe le azioni derivanti dai controventi e da queste nascono sforzo di taglio e momento. Partendo ad esempio da una configurazione a K, le caratteristiche di sollecitazioni sono le seguenti:

Per l'equilibrio il taglio è definito genericamente come:

$$V = \frac{M_1 + M_2}{e} \quad (8)$$

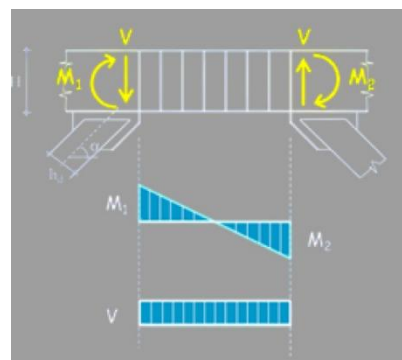


Figura 25 Funzionamento del link

Questa formulazione è possibile semplificarla nel caso di sistema a K tenendo in conto della simmetria e se non sono presenti o si trascurano i carichi verticali:

$$V = \frac{2M}{e} \quad (9)$$

Di conseguenza il link è soggetto sia a taglio che flessione, quindi la plasticizzazione, può avvenire per un motivo o per l'altro. In genere per capire quale tipologia precede l'altra, si possono effettuare i seguenti confronti:

$$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} < \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}} \quad \text{Plasticizzazione per taglio} \quad (10)$$

$$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} = \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}} \quad \text{Plasticizzazione per taglio e flessione} \quad (11)$$

$$\frac{V_{pl,Rd}}{V_{Ed}} > \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}} \quad \text{Plasticizzazione per flessione} \quad (12)$$

Alcuni esperimenti hanno mostrato che la resistenza ultima del link è leggermente maggiore della resistenza plastica, a causa della presenza della soletta dell'impalcato e di fenomeni come l'incrudimento. Infatti, è stato notato che la resistenza massima a taglio è circa 1.5 volte rispetto a quello plastico se il comportamento inelastico è dominato dal taglio. Con lo stesso fattore incrementale, anche il momento ultimo è maggiore di quello plastico se è governato dal momento.

2.3. Verifiche (EN 1993-1-1)

Le strutture a telaio analizzate sono realizzate totalmente in acciaio che necessitano delle verifiche previste nel capitolo 4 delle NTC 2018 o EN 1993-1-1. All'interno del codice, l'ottimizzazione sfrutta alcune verifiche principali, qui sotto riportate.

L'acciaio è una lega metallica del carbonio, che può essere presente in diverse quantità. La percentuale di contenuto (rispettivamente minore o maggiore di 1.7% del peso) consente di

distinguere tra acciaio e ghisa. Incrementando il quantitativo di carbonio, aumenta la resistenza del materiale, ma diminuisce la sua duttilità e la sua saldabilità.

Le proprietà del materiale, in generale, sono definite attraverso i valori caratteristiche X_K che corrisponde al frattile della distribuzione statistica della proprietà del materiale ottenuta con prove standardizzate. Per l'acciaio strutturale derivano da valori nominali. Per passare da valori caratteristici a valori di progetto X_d è necessario dividere per il coefficiente parziale di sicurezza γ_M della proprietà.

$$X_d = X_K / \gamma_M \quad (13)$$

L'eccezione riguarda le strutture in acciaio in cui la resistenza di progetto R_d è ottenuta direttamente dai valori caratteristici delle proprietà dei materiali e dai dati geometrici e successivamente divisa per il coefficiente parziale di sicurezza γ_M .

$$R_d = R(X_K, a_K, \dots) / \gamma_M \quad (14)$$

I fattori parziali di sicurezza γ_M sono differenti a seconda delle verifiche che devono essere eseguite:

- Resistenza della sezione, indipendentemente dalla classe (per ULS), γ_{M0} (solitamente $\gamma_{M0} = 1.00/1.05$);
- Resistenza dell'elemento all'instabilità (per ULS), γ_{M1} (solitamente $\gamma_{M1} = 1.00/1.05$);
- Resistenza alla frattura in trazione (per ULS), γ_{M2} (solitamente $\gamma_{M2} = 1.25$);

Secondo l'eurocodice, le proprietà standard dell'acciaio strutturale sono:

- Modulo elastico

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

- Modulo di taglio

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \approx 81\,000 \text{ N/mm}^2$$

- Modulo elastico

$$\nu = 0.3$$

- Coefficiente di espansione termica

$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ per } K \text{ (per } T \leq 100^\circ\text{C)}$$

Per l'acciaio strutturale la normativa prevede una riduzione di resistenza allo snervamento f_y e di resistenza ultima f_u in base allo spessore della sezione. La tabella 3.1 dell'EN 1993-1-1 definisce i valori ridotti.

Table 3.1: Nominal values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u for hot rolled structural steel

Standard and steel grade	Nominal thickness of the element t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	≥ 490 ≥ 510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	≥ 490 ≥ 510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Table 3.1 (continued): Nominal values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u for structural hollow sections

Standard and steel grade	Nominal thickness of the element t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
≥ 420 S 420 NH/NLH ≥ 510	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Tabella 5 Tabella 3.1 EN 1993-1-1

Come ben noto, l'acciaio è caratterizzato da un comportamento simmetrico in trazione e in compressione. Il diagramma di progetto tensione-deformazione dell'acciaio è ottenuto da apposite prove standardizzate. In genere, la legge costitutiva è schematizzata con un modello elastico perfettamente plastico senza considerare l'effetto dell'incrudimento.

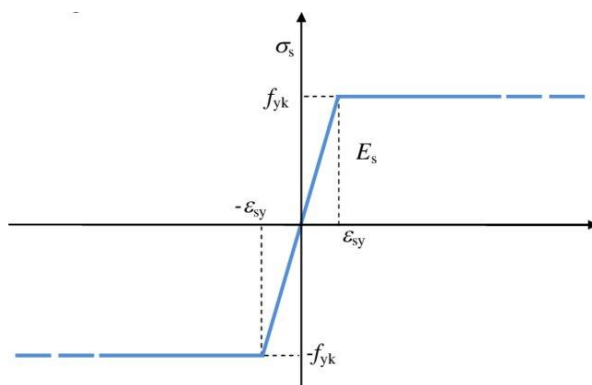


Grafico 2 Legge costitutiva acciaio

In cui:

- f_{yk} è la resistenza caratteristica del materiale.
- ϵ_{sy} è il valore caratteristico di deformazione di snervamento del materiale.
- E_s è il modulo elastico del materiale.

In realtà, l'andamento del grafico sforzo deformazione è simmetrico, ma la risposta è diversa. In compressione, l'acciaio è soggetto a fenomeni di instabilità. Quest'ultima può essere distinta in tre tipologie:

- Instabilità globale: come dice il termine stesso, riguarda l'intero elemento ed è caratterizzato da uno spostamento rigido della sezione trasversale nel proprio piano.

- Instabilità locale: riguarda le parti compresse con spostamenti degli elementi interessati al di fuori del loro piano.
- Instabilità distorsionale: prevede la distorsione della sezione nella configurazione deformata. È un'instabilità intermedia tra le due precedenti ed è tipica degli elementi a parete sottile.

Di conseguenza le normative, sia EN 1993-1-1 che NTC 2018 richiedono la classificazione della sezione che influisce sulle verifiche da eseguire. In particolare, NTC 2018, al capitolo 4.2.3, prevedono una classificazione in funzione della capacità rotazione C_θ :

$$C_\theta = \frac{\theta_r}{\theta_y} - 1 \quad (15)$$

In cui:

- θ_r è la rotazione al raggiungimento della deformazione ultima.
- θ_y è la rotazione al raggiungimento della deformazione allo snervamento.

Questa è influenzata da fenomeni di instabilità locale che non consente di avere una riserva plastica. Di conseguenza la classificazione si effettua in funzione della capacità della sezione trasversale di deformarsi in campo plastico. Il grafico mette in mostra come si comportano le sezioni in base alle diverse classi, relazionando il rapporto tra curvatura e curvatura di snervamento con il rapporto tra momento e momento plastico.

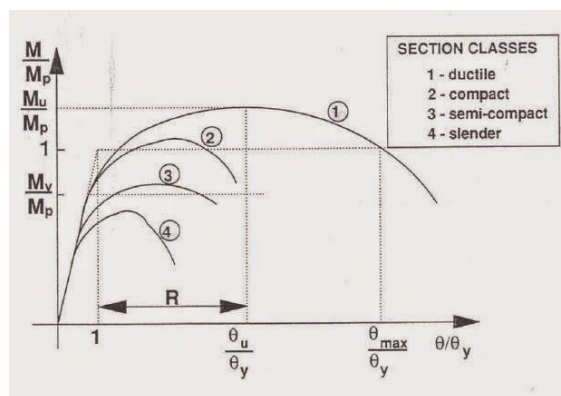


Grafico 3 Classificazione delle sezioni

La normativa NTC 2018 prevede, quindi, le seguenti quattro classi:

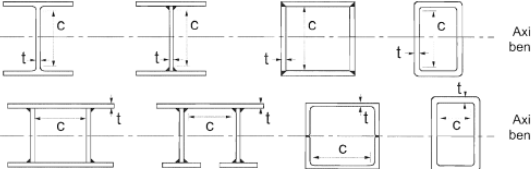
- **Classe I (duttile):** la sezione è in grado di sviluppare una cerniera plastica avente capacità rotazionale maggiore di 3 ($C_\theta \geq 3$). In questo caso è possibile eseguire l'analisi strutturale con il metodo plastico. Il Grafico 3 mostra come la sezione abbia la possibilità di raggiungere un momento ultimo maggiore del momento plastico e una rotazione massima molto maggiore rispetto alla rotazione ultima.

- **Classe 2 (compatta):** è in grado di sviluppare il momento resistente plastico, ma la capacità rotazione è molto minore rispetto alla classe precedente. La normativa definisce Classe 2, quando si verifica la seguente disuguaglianza.

$$1.5 \leq C_\theta < 3 \quad (16)$$

- **Classe 3 (semi-compatta):** la sezione è in grado di raggiungere la tensione di snervamento, ma non è in grado di sviluppare la resistenza plastica. Infatti, il punto massimo della terza curva è al di sotto del rapporto M_p/M_p , ma maggiore di M_y/M_p .
- **Classe 4 (snelle):** la sezione non raggiunge il momento di snervamento, perché è preceduto dall'instabilità locale. Essa influisce già in fase elastica ed in tal caso, durante la verifica, è necessario tenere in conto di una riduzione della sezione, ottenendo una sezione efficace.

L'EN 1993-1-1 consente di determinare la classe di appartenenza in base al rapporto dimensionale c/t (larghezza/spessore) di tutte le parti in compressione della sezione; ad esempio, la classe della sezione IPE, essendo costituita da due flange e un'anima, è determinata dalla classe maggiore degli elementi. È sufficiente una sola parte in Classe 4, che l'intera sezione diventa tale. Di seguito vengono riportate le tabelle (Table 5.2) che consentono la classificazione.

Internal compression parts															
															
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression												
Stress distribution in parts (compression positive)															
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$												
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$												
Stress distribution in parts (compression positive)															
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$												
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	<table><tr><td>f_y</td><td>235</td><td>275</td><td>355</td><td>420</td><td>460</td></tr><tr><td>ϵ</td><td>1.00</td><td>0.92</td><td>0.81</td><td>0.75</td><td>0.71</td></tr></table>	f_y	235	275	355	420	460	ϵ	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71		
f_y	235	275	355	420	460										
ϵ	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71										

*) $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$ or the tensile strain $\epsilon_y > f_y/E$

Outstand flanges															
Rolled sections		Welded sections													
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression													
		Tip in compression	Tip in tension												
Stress distribution in parts (compression positive)															
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$												
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$												
Stress distribution in parts (compression positive)															
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$													
For k_σ see EN 1993-1-5															
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	<table> <tr> <td>f_y</td> <td>235</td> <td>275</td> <td>355</td> <td>420</td> <td>460</td> </tr> <tr> <td>ϵ</td> <td>1.00</td> <td>0.92</td> <td>0.81</td> <td>0.75</td> <td>0.71</td> </tr> </table>	f_y	235	275	355	420	460	ϵ	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71		
f_y	235	275	355	420	460										
ϵ	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71										

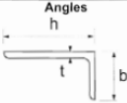
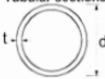
Angles																			
																			
Refer also to "Outstand flanges" (see sheet 2 of 3)																			
Does not apply to angles in continuous contact with other components																			
Class	Section in compression																		
Stress distribution across section (compression positive)																			
3	$\frac{h}{t} \leq 15\epsilon$ and $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$ (EN 1993-1-6)																		
Tubular sections																			
																			
Class	Section in bending and/or compression																		
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$																		
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$																		
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$																		
NOTE For $d/t > 90\epsilon^2$ see EN 1993-1-6.																			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	<table><tr><td>f_y</td><td>235</td><td>275</td><td>355</td><td>420</td><td>460</td></tr><tr><td>ϵ</td><td>1,00</td><td>0,92</td><td>0,81</td><td>0,75</td><td>0,71</td></tr><tr><td>ϵ^2</td><td>1,00</td><td>0,85</td><td>0,66</td><td>0,56</td><td>0,51</td></tr></table>	f_y	235	275	355	420	460	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51
f_y	235	275	355	420	460														
ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71														
ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51														

Tabella 6 Classificazione secondo EN 1993-1-1

La classificazione è fondamentale perché in base alla classe di appartenenza è obbligatorio usare verifiche differenti: Classe 1 e 2 richiedono verifiche in campo plastico, Classe 3 richiede verifica in campo elastico e Classe 4, di nuovo in campo elastico, ma con la sezione efficace. Nella figura viene mostrato l'andamento delle sezioni che rispetta quanto detto in precedenza.

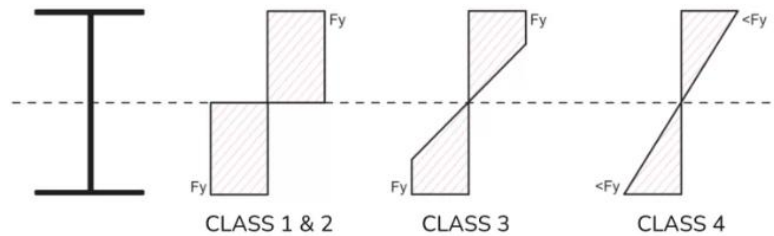


Figura 26 Diagramma di resistenza in base alla classificazione

Riassumendo, il processo per classificare una sezione è:

- 1) Valutazione della posizione dell'asse neutro plastico;
- 2) Controllare se si è in Classe 1 o 2;
- 3) Se il rapporto c/t supera la Classe 2, allora bisogna calcolare la posizione dell'asse neutro elastico;
- 4) Controllare se è nella Classe 3, altrimenti è in Classe 4.

2.3.1. Verifica a trazione (EN 1993-1-1, §6.2.3)

La verifica degli elementi in trazione deve soddisfare la seguente disuguaglianza:

$$\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1.0 \quad (17)$$

Dove N_{ed} è lo sforzo normale di trazione agente sull'elemento e $N_{t,Rd}$ quello resistente. La normativa prevede che la resistenza a trazione dell'elemento $N_{t,Rd}$ è definito come il minimo tra la resistenza plastica dell'elemento $N_{pl,Rd}$ considerando l'intera sezione A e la resistenza ultima $N_{u,Rd}$ considerando l'area netta dell'elemento A_{netta} :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (18)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{netta} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (19)$$

L'area netta tiene in considerazione i fori dovuti alla presenza delle connessioni. La normativa aggiunge, inoltre formule specifiche per elementi angolari connessi in funzione del numero di bulloni:

$$N_{u,Rd} = \frac{2.0 \cdot (e_2 - 0.5d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{con 1 bullone} \quad (20)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{netta} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{con 2 bulloni} \quad (21)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{netta} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{con 3 o più bulloni} \quad (22)$$

In cui i valori di β_2 e β_3 sono definiti nella seguente tabella:

Step p ₁	≤2,5d ₀	≥5d ₀
2 Bolts	$\beta_2=0,4$	$\beta_2=0,7$
3 Bolts	$\beta_3=0,5$	$\beta_3=0,7$

Tabella 7 Coefficienti β_2 e β_3

Un altro caso particolare riguarda la disposizione dei fori di fissaggio quando sfalsati. L'area netta da dedurre è valutata come la massima tra la somma delle aree dei fori in ogni sezione dell'elemento e il valore ottenuto dalla seguente formula (la somma delle aree dei fori lungo la diagonale o il percorso a zig-zag lungo l'elemento):

$$t \cdot n \cdot d_0 - \sum \frac{s^2 \cdot t}{4 \cdot p} \quad (23)$$

In cui:

- t è lo spessore dell'elemento
- n è il numero di fori sulla linea a zig-zag;
- d_0 è il diametro del foro;
- s è la distanza misurata in orizzontale tra due fori consecutivi sul percorso a zig-zag;
- p è la distanza misurata ortogonalmente all'elemento tra gli stessi due fori precedenti.

2.3.2. Verifica a compressione (EN 1993-1-1, §6.3.1)

Inizialmente, EN 1993-1-1, §6.2.4 prevede che la verifica a compressione debba essere eseguita similmente alla verifica a trazione, rispettando, quindi, l'equazione:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (24)$$

Dove N_{ed} è lo sforzo normale di compressione agente sull'elemento e $N_{c,Rd}$ quello resistente. La resistenza a compressione è influenzata dalla classe di appartenenza dell'elemento, perché varia l'area della sezione:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{per Classe 1,2 o 3} \quad (25)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{per Classe 4} \quad (26)$$

In cui A è l'area totale della sezione e A_{eff} è l'area efficace considerato la depurazione delle zone compresse.

Inoltre, per sezioni con un solo asse di simmetria e in Classe 4 è necessario introdurre un'azione di momento aggiuntiva ΔM_{ed} . Questo è dovuto all'eccentricità e_N tra il centro di gravità dell'area totale e il centro di gravità della sezione effettiva. Il valore è definito come:

$$\Delta M_{ed} = N_{ed} \cdot e_N \quad (27)$$

Come già definito in precedenza, però, l'acciaio è soggetto a fenomeni di instabilità quando sottoposto a sforzo assiale di compressione. Questa risulta essere una verifica fondamentale per le strutture in acciaio e viene descritta al capitolo 6.3.1 dell'EN 1993-1-1. Di conseguenza, esiste un valore critico oltre al quale l'instabilità dell'elemento è attivata. Il fenomeno dell'instabilità per effetto di uno sforzo assiale di compressione fu studiato per la prima volta da Eulero nel XVIII sec. e la sua formulazione è ancora tutt'ora in uso. Eulero considerò una trave semplicemente appoggiata di lunghezza l con l'ipotesi ideale di assenza di imperfezioni geometriche. Questo significa che la trave è completamente dritta prima che il carico venga applicato e quest'ultimo sia direttamente applicato nel centro della sezione. Nelle formule successive si considera che il carico è positivo se di compressione. Si trascura, invece, il carico uniformemente distribuito sulla trave, per semplicità. Se il carico non è eccessivamente grande e, di conseguenza, si può studiare nella condizione indeformata, l'equilibrio è garantito per qualsiasi carico. Qualora il carico fosse eccessivamente grande, l'equilibrio non è stabile. Se il carico rimane fisso nella stessa direzione, nasce un momento per effetto della deflessione (v):

$$M = -Pv \quad (28)$$

Sostituendo nell'equazione della linea elastica in cui $EIv'' = M$, allora si ottiene:

$$EIv'' + Pv = 0 \quad (29)$$

che può essere riscritta come:

$$v'' + \frac{P}{EI}v = 0 \rightarrow v'' + \alpha^2v = 0 \quad (30)$$

Risolvendo l'equazione differenziale con le seguenti condizioni al contorno:

$$v = 0 \text{ per } x = 0 \quad (31)$$

$$v = 0 \text{ per } x = l$$

Se si ipotizza che la rigidezza flessionale EI rimane costante, la soluzione può essere scritta come:

$$v(x) = A \sin(\alpha x) + B \cos(\alpha x) \quad (32)$$

In cui A e B sono costanti che dipendono dalle condizioni al contorno e x è la coordinata lungo la trave. Si ricava, quindi, che:

$$B = 0 \quad (33)$$

$$A \sin(\alpha l) = 0$$

La seconda equazione prevede una deflessione diversa da zero solo nel caso in cui $\alpha l = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$

Se si sostituisce il valore di α si ottiene che:

$$\frac{P_{cr}}{EI} l^2 = n^2 \pi^2 \rightarrow P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} EI \quad (34)$$

I valori di P_{cr} sono chiamati carichi critici e sono gli autovalori del problema. Le forme modali, invece, sono descritte dalla seguente formula:

$$v = q_n \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \quad (35)$$

In cui q_n è una costante arbitraria.

Il carico critico di Eulero è il primo autovalore e il più piccolo tra i carichi possibili.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} EI \quad (36)$$

È possibile vedere che il carico è quindi direttamente proporzionale alla rigidità flessionale della trave e inversamente proporzionale al quadrato della lunghezza della trave. Infatti, maggiore è la rigidezza della trave, minore sarà la possibilità di deformarsi e maggiore sarà il carico richiesto per la deflessione non trascurabile. Allo stesso tempo, a parità di rigidezza, maggiore è la lunghezza, maggiore è la snellezza dell'elemento e minore sarà il valore dello sforzo normale critico. Questo risultato parte dall'ipotesi di assenza di imperfezioni. Nel caso reale, con travi reali imperfette, il carico di Eulero è quel valore tale per cui le deflessioni sono molto grandi. Si può notare che P_{cr} non ha una soluzione unica, anche se all'apparenza sembrerebbe, visto l'utilizzo dell'elasticità lineare. In realtà questo principio è valido nel caso di tensioni iniziali nulle, ma nella realtà non è così. Si dovrebbe utilizzare la teoria del secondo ordine che tiene in conto dell'effetto delle deflessioni.

Una soluzione più generale da usare nel caso di supporti differenti è ottenuta dall'equazione della linea elastica del quarto ordine:

$$EIv'''' + Pv'' = 0 \rightarrow v'''' + \alpha^2 v'' = 0 \quad (37)$$

Risolvendo si ottiene:

$$v = A\sin(\alpha x) + B\cos(\alpha x) + Cx + D \quad (38)$$

In cui, A, B, C, D sono le costanti arbitrarie ottenute dalle condizioni al contorno. La soluzione finale più generale del carico critico di Eulero può essere scritta come:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{l_0^2} EI \quad (39)$$

In cui l_0 è la lunghezza libera di inflessione, ovvero la distanza tra due punti in cui il momento è zero.

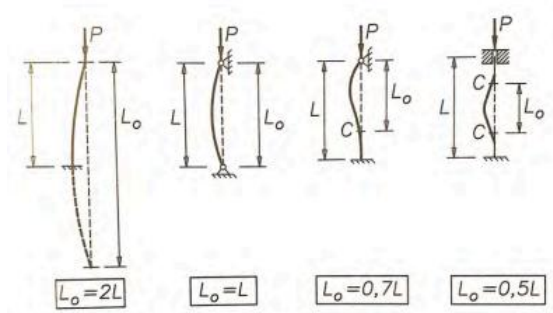


Figura 27 Lunghezza libera di inflessione

Partendo da questo risultato, la normativa esegue la verifica a stabilità flessionale, tipica per elementi come doppio asse di simmetria. Il carico critico viene definito come:

$$N_{cr} = \min \left(\frac{\pi^2}{L_{0,y}^2} EI_y; \frac{\pi^2}{L_{0,z}^2} EI_z \right) \quad (40)$$

Lo stesso calcolo può essere espresso in termini di tensioni:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \min \left(\frac{\pi^2}{\lambda_y^2} E; \frac{\pi^2}{\lambda_z^2} E \right) \quad (41)$$

In cui λ rappresenta la snellezza ed è definita come il rapporto tra il momento di inerzia I e la lunghezza libera di inflessione L_0 e l'area A . Il rapporto tra il momento di inerzia e l'area è definito come raggio di rotazione e si indica con ρ . La snellezza è, quindi, un parametro fondamentale per capire per quale ragione può collassare una trave. Plottando la cosiddetta curva di stabilità che mette in relazione la snellezza con la tensione si può ottenere il seguente grafico.

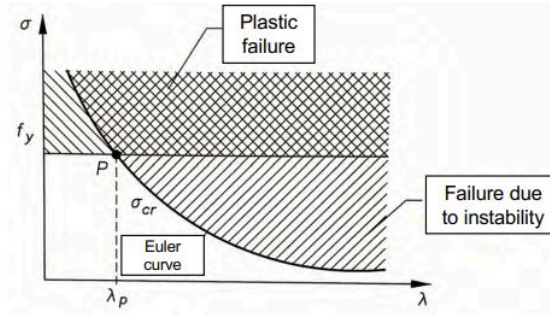


Grafico 4 Curva euleriana

Quest'ultima viene anche definita come curva di Eulero ed è rappresentata insieme alla resistenza del materiale (linea in corrispondenza di f_y). Le due curve si incontrano per un valore di snellezza pari a λ_p . Per snellezze minori, che significa travi lunghezza non eccessive, il collasso avviene per il raggiungimento della resistenza massima a compressione, mentre per snellezze elevate prevale l'instabilità. Quando la snellezza è esattamente pari al valore critico, l'instabilità e la plasticizzazione avvengono nello stesso momento. λ_p è ottenuto uguagliando le due tensioni:

$$\lambda_p = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (42)$$

La formulazione precedente deriva dall'ipotesi di assenza di imperfezioni meccaniche e geometriche. Se, invece, vengono tenute in considerazione, possono essere approssimate come una deformazione sinusoidale. In presenza di esse, la deflessione δ aumenta e, perciò, è necessario considerare un momento aggiuntivo oltre alla presenza della compressione. La deflessione può essere calcolata proporzionalmente al valore di deflessione iniziale dovuta alle imperfezioni con la seguente approssimazione:

$$\delta = \delta_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (43)$$

Dalla formulazione, si può vedere che la relazione tra carico e spostamento verticale tende asintoticamente al valore critico del carico. Quando la fase elastica è terminata, la rigidezza inizia a diminuire e di conseguenza un aumento della deformazione anche con un valore di N minore di N_{cr} .

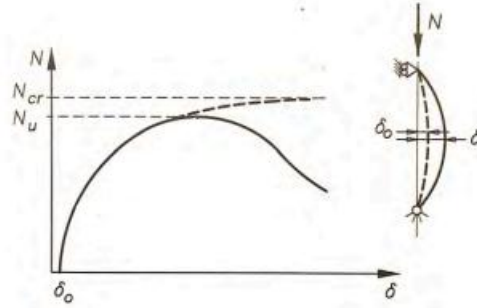


Grafico 5 Carico critico

Considerando, quindi, la deflessione, la sezione di mezzzeria sarà soggetta a momento e a sforzo normale. La massima tensione può essere ottenuta utilizzando la formula di Navier:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{N \cdot \delta}{W} = \frac{N}{A} + \frac{N \cdot \delta_0}{W} \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (44)$$

Eseguendo un confronto tra i risultati ottenuti con la considerazione o no delle imperfezioni, si ottiene il Grafico 6. Si può vedere come nel caso di elementi non perfetti, la resistenza è ridotta. Infatti, solo per snellezze inferiore a $0,2\lambda_p$, la plasticizzazione precede l'instabilità. La presenza delle imperfezioni facilita l'instabilità della trave.

A partire dalla (42), eseguendo le seguenti sostituzioni (43) è possibile ricavare le formule che vengono utilizzate dall' EN 1993-1-1 per la verifica all'instabilità.

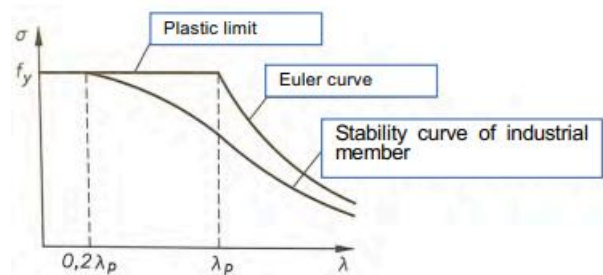


Grafico 6 Confronto curve con imperfezioni oppure senza imperfezioni

$$\sigma = f_y; N = \sigma_m \cdot A; N_{cr} = \sigma_{cr} \cdot A; \eta = \frac{A \cdot \delta_0}{W} \quad (45)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y A}{N_{cr}}}; \chi = \frac{\sigma_m}{f_y}$$

$\bar{\lambda}$ è chiamata snellezza adimensionale, χ fattore di riduzione, η è un parametro adimensionale che è in funzione delle imperfezioni iniziale. Per eseguire un calcolo più semplice, tutti i difetti possibili degli elementi sono stati analizzati e η è stato calibrato in funzione della sezione e dei vincoli presenti. Dall'analisi sperimentale, il coefficiente è stato determinato da 4 curve parametriche di 4 tipologie di sezione che sono espresse dal parametro Φ . Quest'ultimo, previsto dall' EN 1993-1-1, è chiamato fattore di imperfezione e la sua formula è:

$$\Phi = \frac{[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]}{2} \quad (46)$$

dove α è il fattore di imperfezione associato alle curve di instabilità (Tabella 6.1 dell'EC3):

Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabella 8 Fattore di imperfezione α

Il parametro χ è determinato in funzione di Φ e $\bar{\lambda}$:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad (47)$$

Dove:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{per Classe 1,2 e 3 per Classe 1,2 e 3 (} A_{eff} \text{ per Classe 4)} \quad (48)$$

La verifica finale secondo l' EN 1993-1-1 consiste nel confrontare carico assiale N_{Ed} con il carico di instabilità $N_{b,Rd}$:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (49)$$

In cui:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{per Classe 1,2 e 3 (} A_{eff} \text{ per Classe 4)} \quad (50)$$

L' EN 1993-1-1 mette a disposizione una tabella per individuare le curve di instabilità per varie tipologie di sezioni e classi di acciaio.

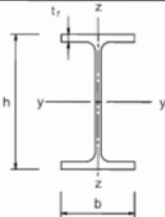
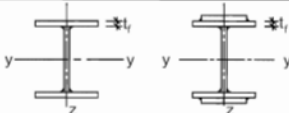
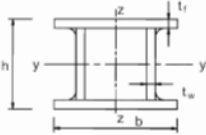
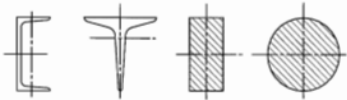
Cross section		Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Rolled sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y a z-z b	a_0 a_0
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y b z-z c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y b z-z c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y d z-z d	c c
Welded I-sections		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y b z-z c	b c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y c z-z d	c d	
Hollow sections		hot finished	any	a	a_0
		cold formed	any	c	c
Welded box sections		generally (except as below)	any	b	b
		thick welds: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	any	c	c
U-, T- and solid sections			any	c	c
L-sections			any	b	b

Tabella 9 Definizione curve di instabilità

2.3.3. Verifica a flessione + sforzo assiale (EN 1993-1-1, §6.2.9)

La verifica di un elemento soggetto a momento flettente e sforzo assiale può essere eseguita in due modi differenti: un procedimento più preciso e uno semplificato.

Il primo metodo richiede un'analisi approfondita che prevede di studiare l'interazione tra sforzo normale e resistenza a flessione della trave. Per la Classe 1 e 2, la presenza di uno sforzo assiale influenza la resistenza plastica dell'elemento. La condizione da verificare è:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (51)$$

In cui M_{Ed} è il momento di progetto e $M_{N,Rd}$ è la resistenza del momento quando soggetto a sforzo assiale N_{Ed} . A seconda delle differenti sezioni si possono ottenere formulazioni differenti:

- In caso di sezione rettangolare senza fori di fissaggio:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[1 - (N_{Ed}/N_{pl,Rd})^2 \right] \quad (52)$$

- In caso di sezioni con doppia simmetria I- e H-, la verifica per l'effetto del momento resistente attorno all'asse y-y, quando entrambi i criteri sono soddisfatti:

$$N_{Ed} \geq 0.25N_{pl,Rd} \quad (53)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (54)$$

Invece, attorno all'asse z-z:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (55)$$

- La normativa fornisce alcune specifiche formule (dalla 6.36 a 6.40 di EN 1993-1-1:2005) riguardo a specifici profilati a I, H o a sezione chiusa in cui è possibile trascurare la presenza dei fori di fissaggio.
- Nel caso di contemporaneità dei momenti attorno ai due assi il seguente criterio deve essere usato:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1 \quad (56)$$

In cui α e β sono due costanti che possono essere considerate in modo conservativo pari ad 1, oppure:

- I e H:

$$\alpha = 2; \beta = 5n \geq 1 \quad (57)$$

Dove $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$

- Sezioni chiuse circolari:

$$\alpha = 2; \beta = 2 \quad (58)$$

Per le sezioni in Classe 3, in assenza di forza tagliante, la tensione longitudinale massima deve verificare la seguente condizione:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (59)$$

Dove $\sigma_{x,Ed}$ è il valore di progetto della tensione longitudinale derivante dal momento e dallo sforzo longitudinale.

Per le sezioni in Classe 4 richiede la stessa formulazione, ma la tensione $\sigma_{x,Ed}$ è ottenuta dalla sezione effettiva.

Il secondo metodo, invece, prevede un'interazione lineare tra le componenti di momento e sforzo assiale secondo la seguente formulazione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (60)$$

In elementi compressi e soggetti a sforzo normale, è molto rara l'assenza di problemi di instabilità; pertanto, risulta essere una verifica molto importante. Esistono due possibili fenomeni di instabilità:

- Instabilità nel piano: i vincoli impediscono l'instabilità della flangia compressa con la flessione nel piano dell'elemento;
- Instabilità flessio-torsionale: oltre all'instabilità, è presente anche uno spostamento laterale tipico della torsione.

Le verifiche degli elementi soggetti a flessione e compressioni vengono eseguiti tenendo in considerazione il dominio di interazione tra la compressione e il momento lungo i due assi.

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} &\leq 1 \\ \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (61)$$

In cui:

- χ_y e χ_z sono il fattore di riduzione dovuto all'instabilità flessionale;
- k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} sono fattori di interazione; questi valori sono opportunamente tabellati e il loro valore dipende dalla distribuzione dei momenti;
- χ_{LT} è il fattore di riduzione dovuto all'instabilità flessio-torsionale;
- N_{Rk} , $M_{y,Rk}$, $M_{z,Rk}$ sono i valori caratteristici di resistenza. In particolare, $M_{y,Rk}$ e $M_{z,Rk}$ sono definiti come Wf_y , dove W è il modulo di resistenza plastico se la sezione è in Classe 1 o 2, elastico minimo se in Classe 3 o elastico minimo effettivo se in Classe 4.

La scelta dei diversi parametri è racchiusa nella seguente tabella:

Class	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Tabella 10 Parametri per instabilità flessio-torsionale

2.3.4. Verifica spostamenti massimi

L'Eurocodice non definisce uno spostamento orizzontale massimo da normativa per un edificio multipiano, mentre per un edificio con un solo piano è posto pari a $h/150$, in cui h è l'altezza dell'edificio. Per impostare la limitazione si può far riferimento ad un articolo scritto da (*R. Smith, 2011*) in cui è stata eseguita un'indagine sulla funzionalità dei limiti imposti nei codici di progettazione per edifici alti. In generale, gli spostamenti orizzontali massimi vengono imposti tra $h/200$ e $h/600$, anche se i limiti sono impostati di solito pari a $h/500$. Di conseguenza il valore massimo viene scelto arbitrariamente tra i due limiti.

2.3.5. Altre verifiche (EN 1993-1-1)

Secondo EN 1993-1-1:2005, altre verifiche devono essere eseguite. Ne viene riportato un elenco, al quale si aggiungono quelle definite in precedenza:

- Verifica della resistenza a momento flettente;
- Verifica a taglio;
- Verifica dell'interazione taglio e momento flettente;
- Verifica dell'interazione taglio, sforzo normale e momento flettente;
- Verifica dell'interazione sforzo di trazione e momento flettente;
- Verifica dell'instabilità torsionale;
- Verifica della durabilità;
- Verifica a fatica;

CAPITOLO 3 – DESIGN PARAMETRICO

3.1. Obiettivo ed ipotesi

Il programma è stato implementato in modo da trovare la miglior soluzione che minimizza la massa di un edificio alto a telaio sotto l'azione del carico orizzontale del vento. Allo stesso tempo, però, deve garantire la resistenza dei singoli elementi e lo spostamento massimo all'interno del limite imposto da normativa. Il codice è stato scritto seguendo diversi step in modo da fornire un'attenta analisi sugli effetti dell'integrazione tra design parametrico e ottimizzazione evolutiva. Permette, infatti, di analizzare strutturalmente un edificio a telaio definito parametricamente aventi come variabili, numero di piani e numero di moduli per piano, larghezza di modulo e altezza di piano. Successivamente, viene eseguita l'ottimizzazione con solutore evolutivo. Il codice consente di lavorare in diversi modi: si può fissare la disposizione dei controventi e lasciar libera la tipologia di controvento e la sezione degli elementi; in alternativa si può fissare la tipologia ed eliminare le aste o l'intero controvento dove non necessario. Anche nel secondo caso, si possono ottimizzare le sezioni degli elementi.

Il programma è basato sulle seguenti ipotesi e semplificazioni:

- Analizzare la struttura come un telaio 2D;
- Edificio a base quadrata, con lo stesso numero di moduli ed elementi sui 4 lati.
- Trascurare l'indeformabilità del piano;
- Trascurare l'effetto torsionale del vento derivante dall'eccentricità prevista da normativa;
- Trascurare la massa di bulloni, saldature e connessioni, decisamente inferiore rispetto a quella degli elementi;
- I controventi sono soggetti esclusivamente ad azioni assiali, mentre le colonne e le travi anche a momento e taglio.
- I controventi si considerano incernierati alle travi e pilastri, mentre i collegamenti tra travi e colonne risultano degli incastri;
- Le colonne e i controventi sono incernierati alla base;

Le prime due ipotesi derivano principalmente dall'eccessivo numero di combinazioni possibili che rendono insostenibile dal punto di vista computazione il programma. Infatti, la struttura in 3D è ottenuta specchiando sui 4 lati il telaio analizzato in 2D. La terza e la quarta ipotesi sono accettabili considerando l'idea con la quale è stato creato il programma. Le ultime tre semplificazioni sono legate direttamente al tipo di struttura analizzata. Il flusso del programma può essere riassunto come segue:

1. Definizione della geometria in modo parametrico facendo variare l'altezza di interpiano, il numero di piani e la larghezza dei moduli tra le colonne (capitolo 3.3).

2. Definizione della disposizione dei controventi. Può essere definita a priori oppure rientrare nell'ottimizzazione (capitolo 3.3.3).
3. Assegnazione di sezione, materiale e vincoli di estremità alle aste (capitolo 3.5 e 3.6);
4. Applicazione dei carichi (capitolo 3.4);
5. Analisi FEA della struttura (capitolo 3.7);
6. Esecuzione dell'ottimizzazione con *Galapagos* e/o *Optimize Cross Section* (CAPITOLO 4 – OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA EVOLUTIVA).

Di seguito verranno spiegati uno ad uno questi passaggi, riassunti nello schema presentato di seguito (Figura 28 Diagramma di flusso (flow chart)).

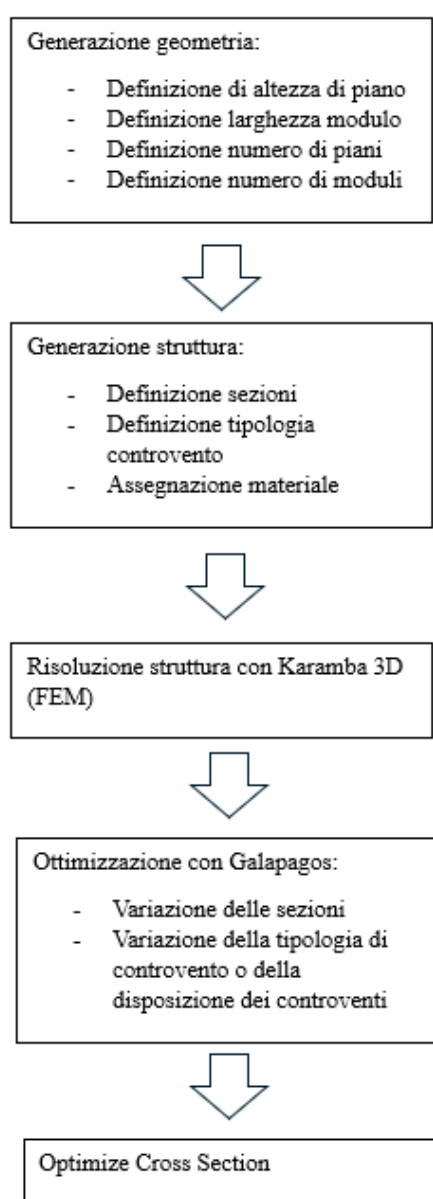


Figura 28 Diagramma di flusso (flow chart)

3.2. Software utilizzati

La generazione della struttura e il calcolo delle sollecitazioni all'interno di ogni elemento sono stati eseguiti con il collegamento di software collaboranti tra loro:

- *Grasshopper*: è un linguaggio ed un ambiente di programmazione grafico basato sulla modellazione algoritmica ed è eseguito all'interno del software *Rhinoceros (Rhino 8)*. Si basa su rappresentazioni matematiche utilizzate per modellare qualsiasi forma 3D. Ogni componente o comando è costituito da una sorta di scatola dotata di uno o più input e uno o più output. I punti di ingressi e di uscita vengono chiamati nodi e il collegamento di essi con altre scatole descrive la relazione tra ogni blocco. I programmi sono realizzati trascinando, quindi, i blocchi su un'area di disegno. Lavorare con un ambiente visivo può facilitare la comprensione dei collegamenti tra i comandi. Per come è stato definito, il software *Grasshopper* consente anche la modellazione parametrica per l'ingegneria strutturale. Questo è il motivo per cui si è scelto di usare il software *Grasshopper*: è possibile far variare le dimensioni e le caratteristiche della struttura senza dover ridisegnare completamente la geometria.
- *Rhinoceros (Versione Rhino 8)*: di norma anche chiamato come *Rhino* o *Rhino 3D* è un software usato per la modellazione 3D di superfici. È in grado di generare, animare, analizzare superfici e solidi NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*), un approccio differente dalle mesh poligonali di altri software. Nell'elaborato è stato utilizzato per visualizzare in modo istantaneo il risultato scritto attraverso il software *Grasshopper*. La scelta di utilizzare questo programma è strettamente dovuta alla possibilità di controllare immediatamente se quanto scritto nel software *Grasshopper* è corretto.
- *Karamba 3D*: è un plug-in dei due software precedenti che consente di eseguire analisi agli elementi finiti (FEA) in modo rapido. È possibile calcolare gli sforzi e le tensioni all'interno di ogni singola asta assegnando ad ogni elemento i vincoli, le sezioni e i materiali. Inoltre, consente di ottenere anche il massimo spostamento della struttura. È stato ideato per le prime fasi della progettazione. All'interno del programma è stato utilizzato per risolvere la struttura intera.
- *Galapagos*: è un tool presente nell'ambiente *Grasshopper* che combina algoritmi genetici e computazione iterativa per risolvere problemi complessi e ottimizzare geometrie, parametri o prestazioni (ad esempio spostamento massimi). Viene definito come “evolutionary solver” perché funziona attraverso un ciclo di selezione, crossover e mutazione per trovare la soluzione ottimale ad un problema. L'idea può essere riassunta in:
 - Popolazione iniziale: set casuali di possibili soluzioni;
 - Fitness function: definizione dell'obiettivo (massimizzazione o minimizzazione);

- Selezione: sopravvivono solo le soluzioni migliori, che vengono usate per generare la prossima “generazione”;
- Crossover e Mutazione: combinazione delle soluzioni per introdurre diversità e miglioramenti.
- Iterazione: ripetizioni del ciclo fino a raggiungere la soluzione più soddisfacente.

Nel programma proposto è stato utilizzato per ottenere la soluzione ottimale in grado di minimizzare la massa variando la tipologia di controvento e la sezione degli elementi.

3.3. Realizzazione geometria

Il primo step del programma prevede di realizzare la geometria di uno dei lati dell’edificio come una struttura in due dimensioni, altezza e larghezza. La struttura è realizzata in modo parametrico ed è quindi possibile variare alcune delle sue caratteristiche: con gli slider si controlla l’altezza della struttura, il numero di piani, il numero di moduli (cioè, il numero di interspazi tra le colonne) e la larghezza del modulo. Inoltre, introducendo uno slider seguito da un filtro, diverse tipologie di controventi possono essere generate automaticamente. Per semplicità, una tipologia per volta è considerata senza variazione di geometria tra interpiano. Di seguito viene ripercorso passo per passo il filo conduttore del programma che per la prima parte gestisce la geometria dell’edificio. Come detto in precedenza, la geometria è stata realizzata usando il software *Grasshopper* ed il risultato è visibile direttamente con *Rhinoceros*.

3.3.1. Modulo tipo

Inizialmente vengono creati il punto iniziale e il punto finale della prima colonna che verranno collegati attraverso il comando *Line*. Indicando le coordinate dei punti come {X,Y,Z}, il primo ha coordinate {0,0,0} ed è generato con un *panel* (“punto iniziale” - Figura 29). Il secondo punto, invece, è generato a partire dal precedente, ma variando l’altezza. Infatti, dopo aver eseguito *Deconstruct* del punto 1, il punto 2 denominato nel programma come “nodo in H” ha le stesse coordinate in X e in Y, ma diverse in Z. La terza coordinata è gestita con uno slider, “Altezza di piano”, che gestisce l’altezza di ogni singolo piano. Scorrendo lo slider si definisce, quindi, la corretta altezza di piano. Collegando con il comando *Line* i due punti, si ottiene il primo pilastro dell’edificio indicato come “Pilastri”. Allo stesso modo, copiando il punto 2 spostandolo con il comando *Move* di una quantità definita dallo slider “Larghezza modulo”, si ottiene un terzo punto che genera la linea orizzontale, ovvero la trave, chiamata “Linea di piano”. Lo slider “Larghezza modulo” consente di gestire lo spazio tra due colonne successive, impostato con un massimo, ma potenzialmente impostabile a piacimento. Infine, anche la colonna generata in precedenza viene copiata usando sempre il comando *Move*, per crearne una seconda. Al termine di questa fase, quindi, sono state ottenute una trave e due colonne, che

generano il cosiddetto modulo. La Figura 29 mette in mostra quanto descritto in questa prima fase utile per generare il modulo di partenza.

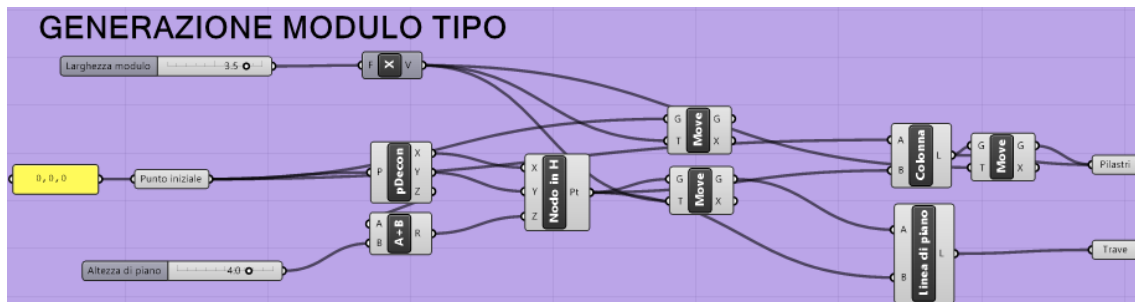


Figura 29 Codice - Generazione modulo tipo

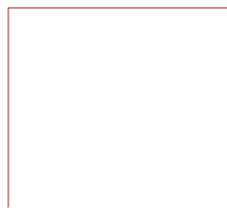


Figura 30 Rhino - modulo tipo

3.3.2. Controventi

Lo step successivo prevede di generare i controventi introdotti nel modulo tipo creato. Tutti i moduli sono inseriti sovrapposti l'uno con l'altro, ma attraverso l'utilizzo di un filtro e di uno slider se ne attiva uno alla volta. Inoltre, con l'oscurazione delle linee non attivate si visualizza la geometria da analizzare. Le tipologie analizzate sono a K, a diagonale tesa, a diagonale compressa, V, V rovescia e X a cui, ad ognuno di questi, è associato un numero nel filtro, da 0 a 5.

Il pattern 0, *tipologia K* (Figura 31), è stata generata unendo le metà di ogni lato del modulo. In primo luogo, vengono divise le due colonne e la trave orizzontale in due parti usando il comando *Divide* e inserendo come numero di elementi 2. Infine, quattro linee vengono create con il comando *line* che uniscono i punti generati a due a due. Per unire tutte le linee, si usa il comando *Merge*.

Il pattern 1 e 2, *tipologia diagonale tesa e diagonale compressa* (Figura 32 e Figura 33) è generata unendo gli estremi delle due colonne in modo incrociato, prima su una diagonale e poi sull'altra diagonale in modo da creare i due patterns. Questa tipologia, però, non è consigliata perché funziona bene se il vento spira solo in una direzione. Infine, unendo con il comando *Merge* le due linee, si ottiene il pattern 5 *ad X* (Figura 36).

Il pattern 3, *tipologia a V* (Figura 34), è realizzato creando due linee che collegano i punti in alto del modulo con il punto sulla trave in mezzzeria generato per la tipologia K. Sempre con il comando *Merge*, si uniscono le due linee.

Il pattern 4, *tipologia a V rovesciata* (Figura 35), è ottenuto nello stesso modo del precedente, ma unendo i punti in basso con la mezzeria della trave superiore.

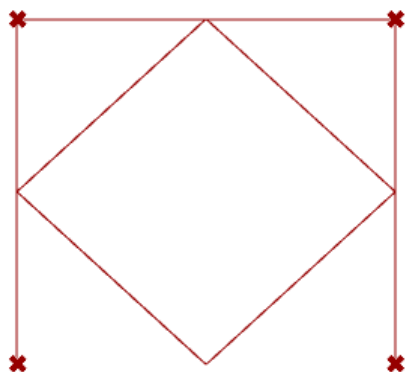


Figura 31 Rhino - Pattern 0

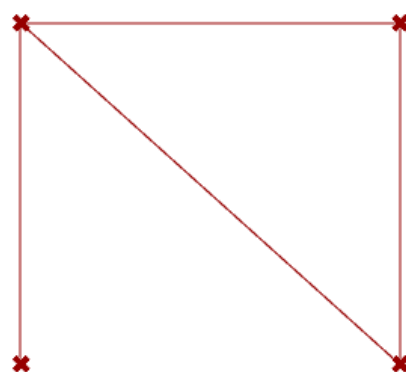


Figura 32 Rhino - Pattern 1

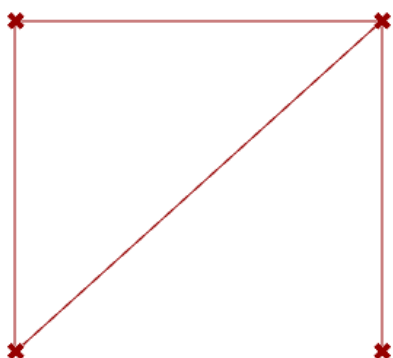


Figura 33 Rhino - Pattern 2

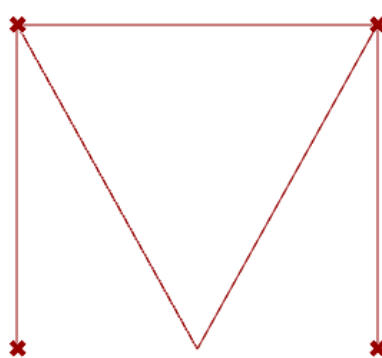


Figura 34 Rhino - Pattern 3

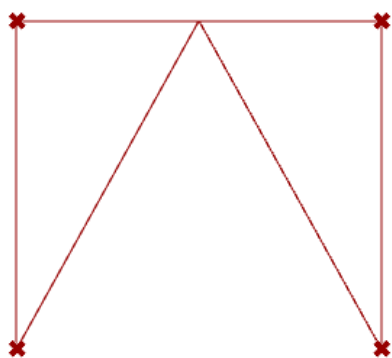


Figura 35 Rhino - Pattern 4

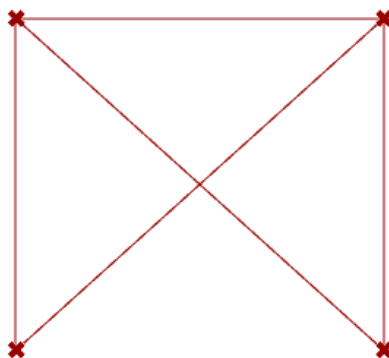


Figura 36 Rhino - Pattern 5

Tutte le tipologie, dopo il comando *Merge*, entrano all'interno del filtro governato da uno slider che va da 0 a 5 con solo numeri interi. Muovendo il cursore dello slider, si seleziona la tipologia voluta. Inoltre, lo slider è anche collegato al solutore per l'ottimizzazione. Infatti, l'ottimizzazione consente di cambiare la tipologia in modo automatico facendo variare il numero dello slider. La Figura 37 fornisce la parte di codice usata per la creazione dei pattern descritti in precedenza.

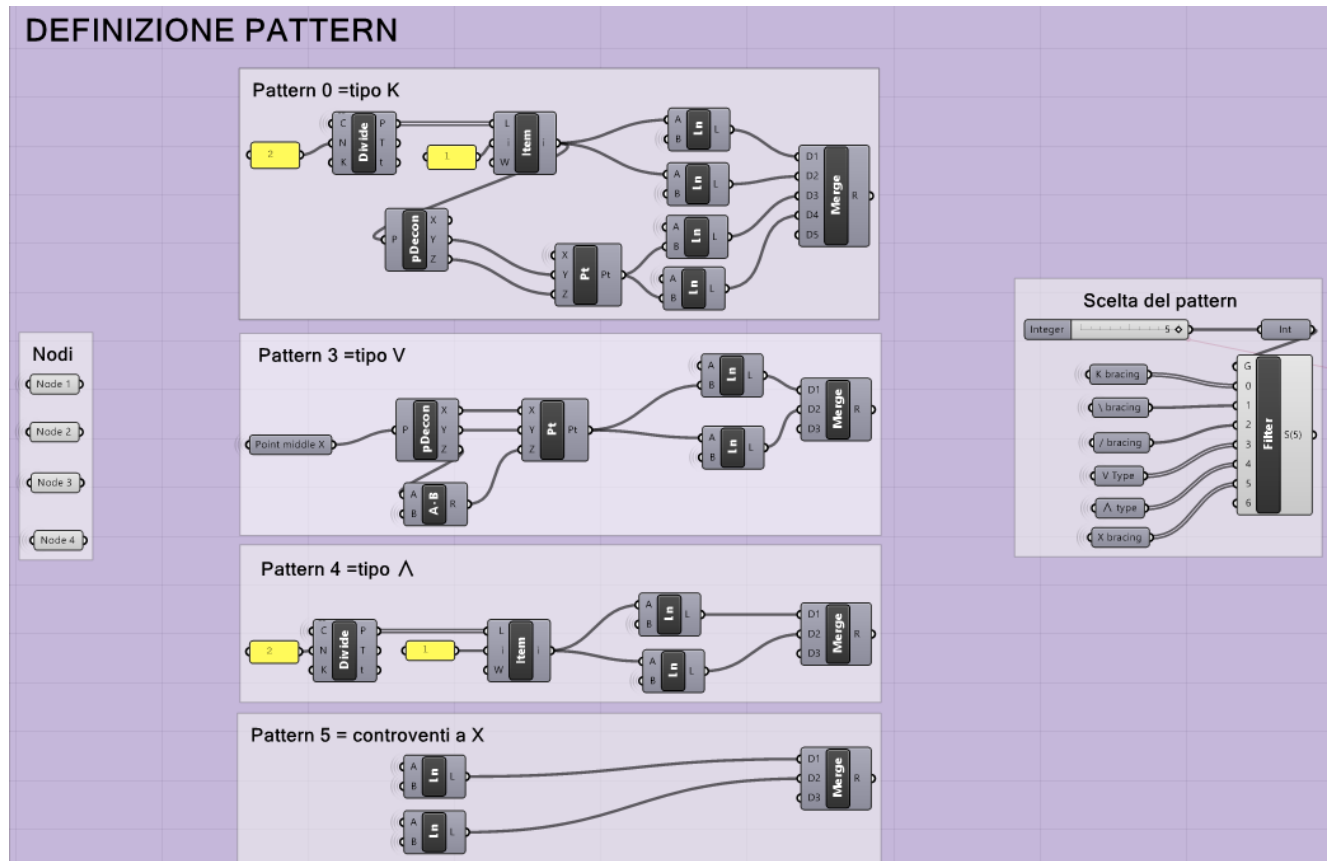


Figura 37 Codice - Definizione pattern

3.3.3. Generazione struttura multi-piano e multi-modulo

Nei due punti precedenti è stato analizzato un singolo modulo con all'interno le differenti tipologie di controventi, ma la struttura è generata da molteplici moduli in altezza e larghezza. La terza parte del programma realizza l'intera struttura, generando l'altezza complessiva e la larghezza definitiva dell'edificio. Due sono i punti fondamentali: il numero di piani e il numero di moduli per piano. Questi vengono gestiti con due sliders denominati come "Numero di moduli" e "Numero di piani". (Figura 38)

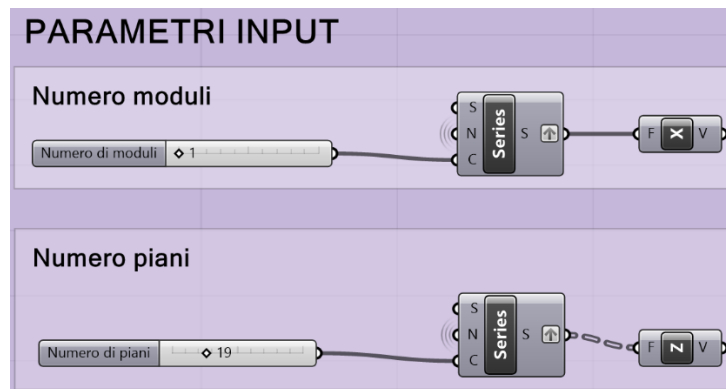


Figura 38 Codice - Parametri input

Questi sliders sono entrambi collegati con il comando *Series*, in cui il termine N indica la distanza in cui deve essere copiata: “Numero di piani” è collegato con lo slider “Larghezza modulo” e “Numero di moduli” con lo slider “Altezza di piano”. L’output è collegato con il comando che consente di gestire la direzione in cui vengono copiati i moduli. Il primo riguarda la larghezza, quindi, in direzione X (*Unit X*), mentre il secondo l’altezza, ovvero la direzione Z (*Unit Z*).

A questo punto è tutto pronto per generare l’intera struttura. Per facilitare le successive operazioni di assegnazione della sezione, i tre elementi, travi, colonne e controventi, sono copiati separatamente. Le travi vengono generate a partire da quella di riferimento del primo modulo copiandolo prima in direzione X e poi in direzione Z, usando due volte il comando *Move*. Un accorgimento importante è l’introduzione del blocchetto *removeDuplicatelines* per evitare che ci siano linee sovrapposte. Non sempre è necessario, ma è utile per avere maggior controllo e sicurezza nel codice. In aggiunta, per consentire il collegamento tra controvento e trave è necessario usare *Line-Line intersection*. In questo modo la trave è suddivisa in due sottoparti connesse con un unico nodo in cui convergono i controventi. Questo accorgimento è necessario solo per le tipologie V, V rovescia e K.

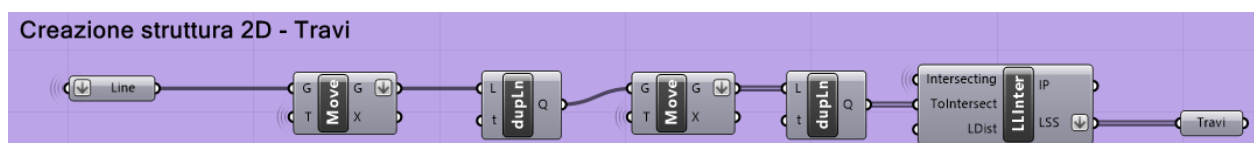


Figura 39 Codice - Creazione struttura 2D - Travi

Allo stesso modo vengono ricreati i pilastri, ripercorrendo esattamente gli stessi passaggi usati per le travi.

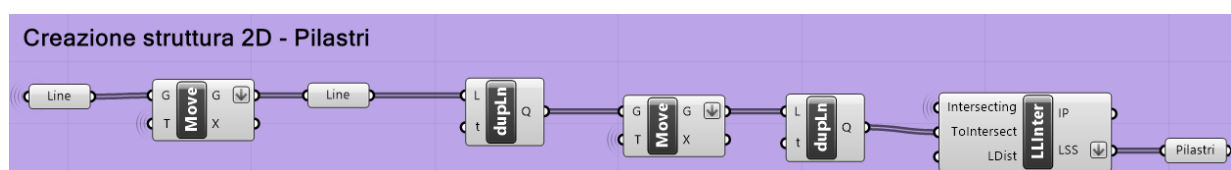


Figura 40 Codice - Creazione struttura 2D - Pilastri

Nei casi studi in cui è stata impostata la simmetria, si costruisce metà struttura seguendo esattamente gli stessi step descritti. Come ultimo passaggio, però, si introduce il componente *Mirror* per specchiare la prima metà di struttura generata.

In conclusione, anche i controventi devono essere copiati in ogni modulo generato. I primi passaggi sono esattamente gli stessi dei due elementi precedenti. Successivamente, meritano, però, una definizione della geometria più approfondita. Infatti, non possono essere presenti in tutti i moduli, perché, nonostante la struttura risulti più rigida, economicamente non è conveniente e non risulta essere necessario. Per gestire la posizione dei controventi due opzioni sono previste: fissata in modo manuale oppure facente parte dell'ottimizzazione con un *Gene Pool*. Il problema risulta essere dal punto di vista computazionale. Infatti, se avessi solo due moduli avrei 2^2 possibili soluzioni, se ne avessi 10 otterrei 2^{10} , quindi, già più di mille possibili soluzioni. Se, invece, fossero 50 moduli, valore tipico negli edifici alti, anche solo di 10 piani, richiederebbe 10^{15} possibili soluzioni. Risulta, dunque, un approccio troppo complicato. L'utilizzo di un solutore evolutivo consente di analizzare solo le combinazioni migliori. Molto spesso, però, la disposizione è prestabilita sfruttando soluzioni ottimali suggerite in letteratura o per esigenze estetiche. Si propone, pertanto, anche la soluzione manuale gestita tramite una colonna di valori inserita in un *panel* in cui l'utente imposta "1" nei moduli in cui vuole inserire il controvento e 0 negli altri seguendo l'ordine definito dalla Figura 41.

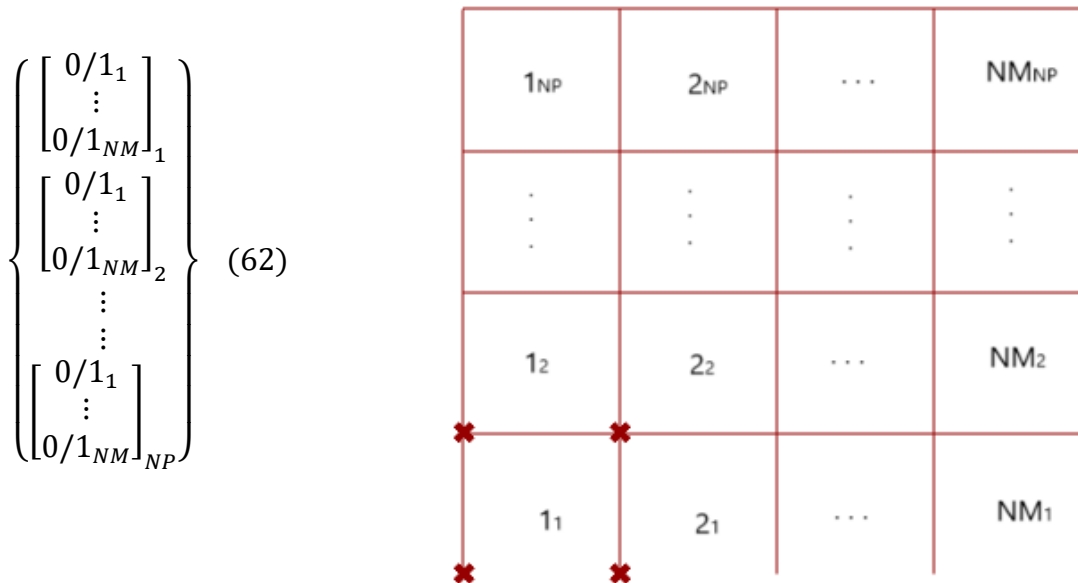


Figura 41 Rhino - Numerazione moduli

Il vettore (62) rappresenta come devono essere disposti i valori. Essi sono ordinati per piani e all'interno per moduli in direzione X. Questo significa che i primi NM (numero di moduli) sono

riferiti al primo piano, i secondi NM al secondo piano fino agli ultimi NM valori relativi all'NP-esimo piano (numero di piani).

In questo modo, la disposizione è definita a priori e non entra più nell'ottimizzazione. L'attivazione è resa possibile grazie ad uno script Python. All'interno dello script si genera un termine "True" o "False" a seconda se nel panel è stato impostato 1 o 0. La dimensione dell'output a , però non è uguale a $NM \times NP$, ma moltiplicato per il numero di aste che compongono il controvento (ad esempio nella tipologia X è pari a 2). In questo modo, con il blocco *Dispatch* si scelgono solo gli elementi a cui è associato il termine vero.

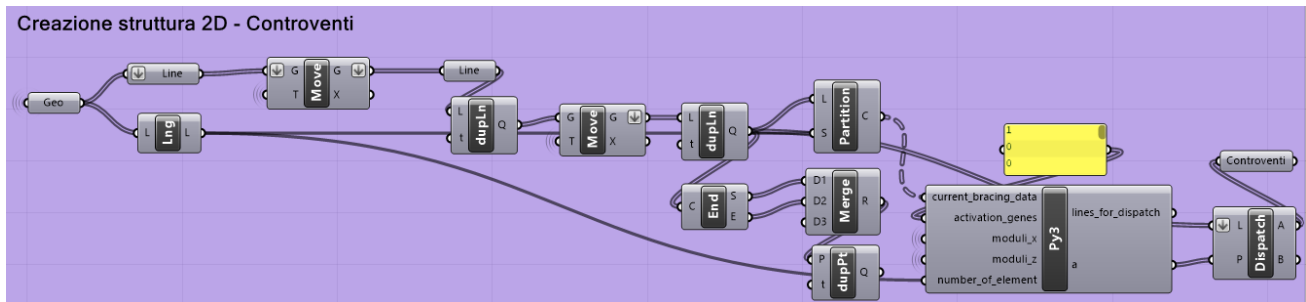


Figura 42 Codice - Creazione struttura 2D - Controventi

Ecco un esempio di disposizione dei controventi con il corretto ordine e disposizione dopo aver eseguito il codice sopra descritto.

$$\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_2, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_3 \right\} = \left\{ \begin{bmatrix} True \\ True \\ False \\ False \\ False \end{bmatrix}_1, \begin{bmatrix} False \\ False \\ True \\ True \\ False \end{bmatrix}_2, \begin{bmatrix} True \\ True \\ True \\ True \\ False \end{bmatrix}_3 \right\} \quad (63)$$

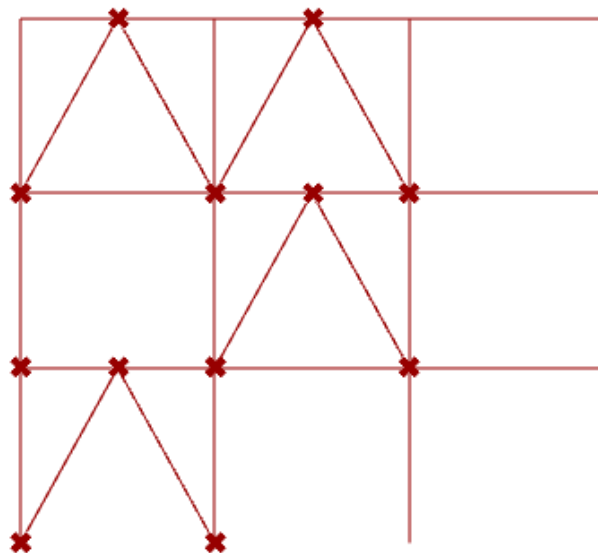


Figura 43 Rhino - Esempio disposizione controventi

Il *Gene Pool* funziona allo stesso modo di questo *panel*, settando il valore su 0 o 1. Questo, connesso a *Galapagos* come variabile, permette di esplorare diverse combinazioni di 0 e 1, in modo da attivare e cancellare i controventi. Se collegato all'input dello script Python, *activation_genes*, permette di

intervenire sui moduli. Altrimenti, può essere utilizzato come discretizzante per le singole aste, selezionandole con il comando *Cull*. La Figura 44 mostra com'è stata implementata la parte relativa al *Gene Pool*.



Figura 44 Codice - gestione controventi

Anche la soluzione di gestione manuale può essere eseguita con *Gene Pool*, ma con un *panel* è possibile facilitare l'operazione, copiando piano per piano se la disposizione ha una certa regolarità.

3.4. Calcolo e applicazione dei carichi

Il codice creato lavora considerando i carichi verticali derivanti dal peso proprio della struttura e dai carichi variabili e i carichi orizzontali del vento combinati tra loro.

3.4.1. Carichi permanenti

I carichi permanenti comprendono il peso derivante da componenti strutturali e non strutturali. Esso consiste, quindi, nel peso dei materiali incorporati nella struttura. Il software *Grasshopper* consente di calcolare il carico generato dalla forza peso automaticamente, assegnando la sezione e il materiale.

3.4.2. Carichi variabili

La normativa NTC 2018 *Capitolo 3.1.4* definisce il carico variabile in base all'utilizzo della struttura. Considerando uso ufficio, si fa riferimento a "cat. B2 Uffici aperti al pubblico" in cui è pari a 3 kN/m².

3.4.3. Vento

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici. Per la progettazione degli edifici alti, il vento ricopre un ruolo importante, al contrario rispetto agli edifici definiti bassi, in cui prevalgono i carichi verticali. Gli edifici che si estendono per altezze elevate sono caratterizzati da frequenze di vibrazione basse, vicine a quella del vento. Di conseguenza, c'è il rischio che si verifichi il pericoloso effetto di risonanza, che amplifica le oscillazioni proprie della struttura portando a problemi di confort per il personale presente all'interno e a danneggiamenti alla struttura. Se questi ultimi fossero eccessivi, si potrebbe verificare il collasso dell'edificio.

Un altro problema importante del vento riguarda la sua imprevedibilità. Definendo il vento come un movimento naturale dell'aria rispetto alla superficie terrestre, non risulta controllabile. Come tutti i fenomeni atmosferici e imprevedibili che colpiscono le strutture civili, vengono studiati con un approccio che tiene in conto della probabilità di accadimento con una determinata intensità.

È possibile individuare due effetti principali del vento sugli edifici alti:

- Genera forze e momenti sulla struttura;
- Distribuisce l'aria all'intero e intorno all'edificio (*Wind pressure*)

Come detto in precedenza, le forze e i momenti generati sono particolarmente rilevanti, perché l'effetto aumenta al crescere dell'altezza rispetto al suolo. Il secondo punto, invece, è strettamente collegato alla formazione di vortici di diverse dimensioni ed effetti rotazionali che rendono il vento imprevedibile e difficile da studiare. A causa dei vortici, si creano raffiche o turbolenze, dannose per la struttura.

I problemi esplicitati hanno richiesto studi sperimentali e simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD) per ottenere formule attendibili utilizzabili per il carico vento. Insieme alle prove nella galleria del vento, i metodi anticipati vengono utilizzati per analizzare strutture con forme non convenzionali.

La normativa italiana NTC 2018 nel capitolo 3.3 riporta:

“Per le costruzioni di forma o tipologia inusuale, oppure di grande altezza o lunghezza, o di rilevante snellezza e leggerezza, o di notevole flessibilità e ridotte capacità dissipative, il vento può dare luogo ad effetti la cui valutazione richiede l'uso di metodologie di calcolo e sperimentali adeguate allo stato dell'arte.”

Possono essere usati sia il metodo proposto dalla normativa americana ASCE 7-22 sia quello proposto dal CNR-DT 207 R1/2018, che riprende la normativa italiana. Di seguito viene proposta la seconda metodologia che verrà utilizzata all'interno del codice per calcolare l'azione del vento.

3.4.3.1. Metodo da normativa (CNR-DT 207 R1/2018)

La descrizione precisa come calcolare l'azione del vento secondo CNR-DT 207/R1/2018 per edifici alti basandosi su quanto proposto dalla normativa italiana.

L'obiettivo è analizzare un edificio alto, di conseguenza è necessario considerare sia la componente dinamica che statica, definendo la struttura come suscettibile all'azione del vento. Il valore deriverà dalla combinazione delle due analisi:

$$F = F_s + F_a \quad (64)$$

Dove:

- F_s sono le azioni aerodinamiche esercitate dal vento sulla struttura fissa;
- F_a sono le azioni aeroelastiche dovute al moto della struttura.

L'analisi evolve nel seguente modo:

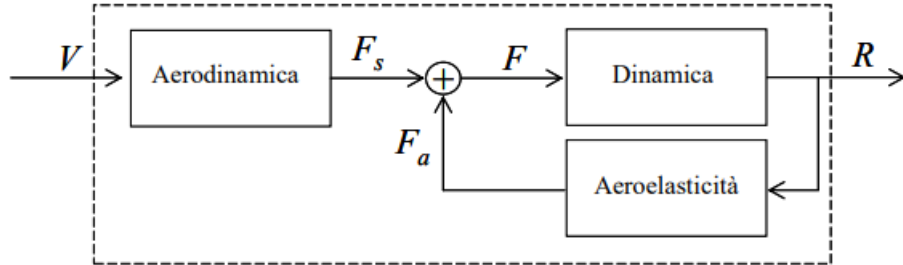


Figura 45 CNR-DT 207 R1/2018 – Processo Analisi

Incominciando dalla componente aerodinamica sulla struttura indeformabile, si ripercorre quanto proposto dall'NTC2018.

La pressione esterna p_e agente sulle facce esterne della costruzione viene calcolata come:

$$p_e(z) = q_p(\bar{z}_e) \cdot c_{pe} \quad (65)$$

In cui:

- q_p è la pressione cinetica di picco del vento;
- c_{pe} è il coefficiente di pressione esterna (positivi se si analizza la faccia sopravento e negativi se si analizza quella sottovento);
- $\bar{z}_e$ è l'altezza di riferimento;

Per ottenere la pressione cinetica di picco del vento q_p , la normativa italiana parte dalla velocità di base di riferimento v_b definita come:

“il valore medio su 10 minuti, a 10 m di altezza sul suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II, riferito ad un periodo di ritorno $TR = 50$ anni.”

Se non diversamente specificato, viene calcolata come il prodotto tra la velocità base di riferimento al livello del mare in funzione della zona in cui sorge la costruzione $v_{b,0}$ e il coefficiente di altitudine c_a (espressione 3.3.1).

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a \quad (66)$$

In cui:

$$c_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{m} \quad (67)$$

Dove i parametri a_0, k_s sono definiti dalla Tab. 3.3.I in funzione della zona in cui sorge la costruzione e a_s è l'altitudine sul livello del mare del sito dove sorge la costruzione.

Tab. 3.3.I - Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Tabella 11 CNR-DT 207 R1/2018 – $v_{b,0}$, a_0 , k_s

Nel caso di altitudini superiori ai 1500 m sul livello del mare, $v_{b,0}$ può essere ricavata da opportune indagini in funzioni delle condizioni climatiche locali, ma i valori previsti non dovranno essere minori di quelli previsti per 1500 m di quota.

La normativa introduce anche la velocità di riferimento, definita come:

“La velocità di riferimento v_r è il valore medio su 10 minuti, a 10 m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (vedi Tab. 3.3.II), riferito al periodo di ritorno di progetto T_R . ”

Essa è calcolata come il prodotto di v_b e il coefficiente di ritorno c_r che è funzione del periodo di ritorno di progetto T_R . Se non diversamente specificato viene assunto un $T_R = 50$ anni che corrisponde ad un $c_r = 1$.

$$v_r = v_b \cdot c_r \quad (68)$$

L'obiettivo è ottenere la pressione del vento sull'edificio. La normativa calcola la pressione cinematica di picco come:

$$q_p(z) = q_r \cdot c_e(z) \quad (69)$$

In cui:

- q_r è la pressione cinetica di riferimento, definita come:

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 \quad (70)$$

Dove ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente pari a 1.25 kg/m³.

- c_e è il coefficiente di esposizione che dipende dall'altezza z sul suolo, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito. Le espressioni per altezza inferiori ai 200 m, sono:

$$c_e(z) = k_r \cdot c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \left[7 + c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min} \quad (71)$$

Dove c_t è il coefficiente di topografia solitamente pari a 1, mentre gli altri sono definiti in funzione della categoria di esposizione del sito (Tab. 3.3.II).

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	K_r	z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Tabella 12 CNR-DT 207 R1/2018 - Parametri per coefficiente di esposizione

La categoria del sito è definita in base alla classe di rugosità, che non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno, ma in base alle costruzioni attorno agli edifici considerati. Tab. 3.3.III riporta una descrizione di ogni classe di rugosità e, combinata con la distanza dal mare definisce la classe di esposizione del sito.

Tab. 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla costa); b) Lago (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate,)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Si può assumere che il sito appartenga alla Classe A o B, purché la costruzione si trovi nell'area relativa per non meno di 1 km e comunque per non meno di 20 volte l'altezza della costruzione, per tutti i settori di provenienza del vento ampi almeno 30°. Si deve assumere che il sito appartenga alla Classe D, qualora la costruzione sorga nelle aree indicate con le lettere a) o b), oppure entro un raggio di 1 km da essa vi sia un settore ampio 30°, dove il 90% del terreno sia del tipo indicato con la lettera c). Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, si deve assegnare la classe più sfavorevole (l'azione del vento è in genere minima in Classe A e massima in Classe D).

Tabella 13 CNR-DT 207 R1/2018 - Classe di rugosità

ZONE 1,2,3,4,5					
	costa mare	2 km	10 km	30 km	500m
A	--	IV	IV	V	V
B	--	III	III	IV	IV
C	--	*	III	III	IV
D	I	II	II	II	III
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5					
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1					

ZONA 9	
	costa mare
A	--
B	--
C	--
D	I

ZONA 6				
	costa mare	2 km	10 km	30 km
A	--	III	IV	V
B	--	II	III	IV
C	--	II	III	III
D	I	I	II	II

ZONE 7,8		
	costa mare	1.5 km
A	--	IV
B	--	IV
C	--	III
D	I	*
* Categoria II in zona 8 Categoria III in zona 7		

Tabella 14 CNR-DT 207 R1/2018 - Classe di esposizione del sito

Definita la pressione di picco del vento è necessario calcolare il coefficiente di esposizione. Esso è strettamente legato all'altezza di riferimento che dipende se la faccia si trova sopravento o sottovento. Nel caso di faccia sopravento, $\bar{z}_e$ è ottenuta in modi differenti a seconda dell'altezza dell'edificio. Se l'edificio è basso, quindi, con un'altezza minore o uguale alla dimensione in pianta ortogonale all'azione del vento, l'altezza di riferimento è pari all'altezza. Se l'edificio è alto, quindi rispetta la seguente equazione (b = dimensione ortogonale al flusso, h = altezza dell'edificio, d = profondità dell'edificio):

$$b < h \leq 5d$$

si definiscono due zone separate. Fino ad una quota pari a b , l'altezza di riferimento è pari proprio a b e, quindi, la pressione è uniforme. Per valori di z compresi tra b e h , si possono usare due metodi, uno semplificato e uno più complicati. Nel primo caso, l'altezza di riferimento è costante e pari all'altezza totale dell'edificio e di conseguenza il valore sarà di nuovo costante. L'azione finale sarà comunque maggiore di quella reale e quindi a favore di sicurezza. Nel secondo caso, invece, è necessario dividere la facciata in tronchi di altezza arbitraria in cui $\bar{z}_e$ è definita come l'altezza massima del tronco.

Nel caso di faccia sottovento, essa è pari all'altezza dell'edificio.

Il coefficiente di pressione esterna è definito rispettando le equazioni della Tabella 15.

Faccia sopravento	Facce laterali	Faccia sottovento
$h/d \leq 1: c_{pe} = 0,7 + 0,1 \cdot h/d$ $h/d > 1: c_{pe} = 0,8$	$h/d \leq 0,5: c_{pe} = -0,5 - 0,8 \cdot h/d$ $h/d > 0,5: c_{pe} = -0,9$	$h/d \leq 1: c_{pe} = -0,3 - 0,2 \cdot h/d$ $1 < h/d \leq 5: c_{pe} = -0,5 - 0,05 \cdot (h/d - 1)$

Tabella 15 CNR-DT 207 R1/2018 - Coefficiente di pressione esterna

Definendo, quindi, q'_p come la pressione sulla faccia sopravento e q''_p sulla faccia sottovento, la forza al piano finale (azione aerodinamica di picco) è calcolata come (Δ = altezza di interpiano):

$$F_d = (c_{pe,sop} \cdot q'_p - c_{pe,sot} \cdot q''_p) b \Delta \quad (72)$$

Per andare a considerare la componente dinamica, bisogna moltiplicare le azioni di picco per il coefficiente dinamico c_d :

$$F_{s,eq} = F_d \cdot c_d \quad (73)$$

Per calcolare il valore del coefficiente viene proposto il metodo dettagliato. La relazione usata per il coefficiente in direzione longitudinale è:

$$c_{dD} = \frac{G_D}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} \quad (74)$$

In cui:

$$G_D = 1 + 2 \cdot g_D \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B_D^2 + R_D^2} \quad (75)$$

Dove:

- G_D è il fattore di raffica longitudinale;
- z_e è l'altezza di riferimento;

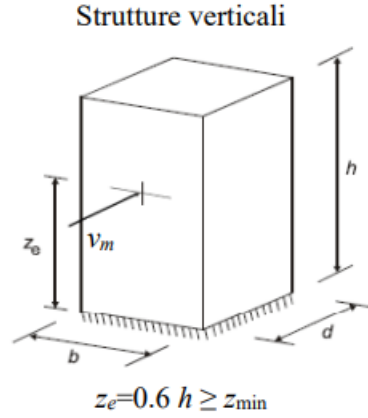


Figura 46 CNR-DT 207 R1/2018 – Definizione altezza di riferimento

- $I_v(z_e)$ è l'intensità della turbolenza, calcolata all'altezza z_e . Viene calcolata come:

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \cdot c_t(z_{min})} \quad \text{per } z \leq z_{min}$$

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot c_t(z)} \quad \text{per } z > z_{min}$$
(76)

Dove:

- z_0 , z_{min} sono la lunghezza di rugosità e l'altezza minima e definita nella Figura 46 CNR-DT 207 R1/2018 – Definizione altezza di riferimento.
- c_t è il coefficiente di topografia.
- g_D è il fattore di picco longitudinale calcolato come:

$$g_D = \sqrt{2 \cdot \ln(v_D \cdot T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(v_D \cdot T)}} \geq 3$$
(77)

In cui:

- v_D è la frequenza attesa della risposta longitudinale;

$$v_D = n_D \cdot \sqrt{\frac{R_D^2}{B_D^2 + R_D^2}} \geq 0.08 \text{ Hz}$$
(78)

- T è l'intervallo temporale su cui è valutata la velocità media del vento, $T=600s$.
- B_D è il fattore di risposta quasi-statica (cautelativamente può essere assunto pari a 1);

$$B_D^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L_v(z_e)} \right)^{0.63}} \quad (79)$$

Dove:

- $L_v(z_e)$ è la scala integrale della turbolenza.

$$L_v(z) = \bar{L} \cdot \left(\frac{z_{min}}{\bar{z}} \right)^k \quad \text{per } z \leq z_{min} \quad (80)$$

$$L_v(z) = \bar{L} \cdot \left(\frac{z}{\bar{z}} \right)^k \quad \text{per } z > z_{min}$$

($\bar{z} = 200\text{m}$, $\bar{L} = 300\text{m}$, z_{min} definita in funzione della categoria di esposizione, k coefficiente che dipende dalla categoria di esposizione del sito).

Categorie di esposizione del sito	κ
I	0,44
II	0,52
III	0,55
IV	0,61
V	0,65

Tabella 16 CNR-DT 207 R1/2018 - Parametro k

- R_D è il fattore di risposta risonante;

$$R_D^2 = \frac{\pi}{4 \cdot \xi_D} S_D \cdot R_h \cdot R_b \quad (81)$$

In cui:

- S_D è un parametro adimensionale che tiene conto del contenuto spettrale della turbolenza longitudinale.

$$S_D = \frac{6.868 \cdot n_D \cdot L_v(z_e)/v_m(z_e)}{\left[1 + 10.302 \cdot n_D \cdot \frac{L_v(z_e)}{v_m(z_e)} \right]^{5/3}} \quad (82)$$

- R_h e R_b sono due parametri adimensionali che tengono conto della coerenza parziale della turbolenza longitudinale.

$$R_h = \begin{cases} 1 & \text{per } \eta_h = 0 \\ \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) & \text{per } \eta_h > 0 \end{cases} \quad (83)$$

$$R_b = \begin{cases} 1 & \text{per } \eta_b = 0 \\ \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) & \text{per } \eta_b > 0 \end{cases}$$

$$\eta_h = 4 \cdot \frac{n_D \cdot h}{v_m(z_e)}$$

$$\eta_b = 4 \cdot \frac{n_D \cdot b}{v_m(z_e)}$$
(84)

- ξ_D è il rapporto di smorzamento relativo al primo modo di vibrare della struttura nella direzione del vento. Per edifici in acciaio è maggiore uguale a 0.008;
- n_D è la frequenza del primo modo di vibrare nella direzione del vento;
Per edifici alti in acciaio è calcolata come:

$$n_D = \frac{1}{0.020h} \div \frac{1}{0.024h}$$
(85)

- $v_m(z_e)$ è la velocità media del vento all'altezza di riferimento.

$$v_m(z_e) = v_r \cdot c_m(z)$$
(86)

$$c_m(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \cdot c_t(z_{min}) \quad \text{per } z \leq z_{min}$$

$$c_m(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot c_t(z) \quad \text{per } z > z_{min}$$
(87)

3.4.4. Combinazione dei carichi

Come richiesto dall'NTC 2018 per gli Stati Limiti Ultimi, è stata utilizzata la Combinazione Fondamentale la cui espressione è riportata di seguito.

$$\gamma_{G_1} \cdot G_1 + \gamma_{G_2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q_1} \cdot Q_{K_1} + \sum \gamma_{G_i} \cdot \psi_{0_i} \cdot Q_i$$
(88)

I coefficienti di sicurezza parziali dei carichi sono definiti dalle NTC2018 nella tabella 2.6.1. Ai fini delle verifiche strutturali è necessario usare la colonna “STR” – A1.

		Coefficiente γ_F	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Tabella 17 NTC2018 - Coefficienti parziali di sicurezza

I coefficienti di combinazione per i carichi variabili sono:

Category / Variable action	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Category A Environments for residential use	0.7	0.5	0.3
Category B Offices	0.7	0.5	0.3
Category C Environments susceptible to overcrowding	0.7	0.7	0.6
Category D Environments for commercial use	0.7	0.7	0.6
Category E Libraries, Archives, Warehouses and Environments for industrial use	1.0	0.9	0.8
Category F Remittances and parking lots (for vehicles of weight $\leq 30\text{kN}$)	0.7	0.7	0.6
Category G Remittances and parking lots (for vehicles of weight $> 30\text{kN}$)	0.7	0.5	0.3
Category H Covers	0.0	0.0	0.0
Wind	0.6	0.2	0.0
Snow (at altitude $\leq 1000\text{ m s.l.m.}$)	0.5	0.2	0.0
Snow (at altitude $> 1000\text{ m s.l.m.}$)	0.7	0.5	0.2
Thermal variation	0.6	0.5	0.0

Tabella 18 NTC2018 - Coefficienti di combinazione per carichi variabili

Inoltre, per la verifica dello spostamento è stata utilizzata la combinazione frequente agli SLS, Stati Limite di Servizio, come richiesto da NTC 2018, la cui formula è riportata, qui, sotto.

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{K1} + \sum \psi_{2i} \cdot Q_i \quad (89)$$

La normativa definisce questi coefficienti per strutture correnti. Analizzando un edificio alto, in fase di predimensionamento, si è deciso di penalizzare particolarmente l'azione del vento, attribuendo un fattore di combinazione unitario. In questo modo si cerca di sopperire alle semplificazioni eseguite per passare dalla struttura 3D a 2D, come trascurare il momento torcente. Sicuramente la scelta è molto conservativa, ma in questa fase di progettazione si ritiene accettabile. Negli step successivi di design, si analizzerà con valori più precisi.

3.4.5. Applicazione dei carichi

La definizione della posizione dei carichi è un elemento cruciale per l'analisi. Il peso proprio della struttura è uniformemente distribuito sugli elementi, mentre il carico vento è applicato in particolari nodi. Teoricamente il carico vento è applicato nel centro di massa del piano, ma se la struttura non è simmetrica o complicata è difficile da determinare. In una struttura analizzata in 2D, ci sono possibili soluzioni per semplificare il problema. In *Sotiropoulos et al. (2021)* si possono vedere tre combinazioni di carichi differenti: applicazione del carico all'estremità sinistra, a quella a destra o l'applicazione del carico in mezzzeria della struttura. La normativa indica di analizzare diverse combinazioni in modo da valutare i diversi scenari. Nel CAPITOLO 5 – CASI STUDIO verranno proposti diversi casi studi con differenti configurazioni di carico.

Questa fase del programma prevede due step: definizione dei punti di applicazione del carico ed applicazione del carico.

Partendo dall'applicazione dei carichi sui nodi laterali, è necessario selezionarli. Questi corrispondono ai punti con la coordinata X uguale a 0. Si parte quindi dalla lista di trave e si prendono i nodi di estremità con il comando *End Points*. Questo blocco fornisce come output, punti di inizio e di fine (*Start* e *End*). I nodi determinati, sia iniziali che finali, vengono collezionati all'interno della stessa lista e con il comando *pDecon* se ne determinano le coordinate. Vengono selezionati, quindi, i nodi attraverso il comando *Cull*, che crea una lista dei soli nodi con la X pari a 0. Il comando *Equals* fornisce come output una lista di termini *True* e *False*, rispettivamente se la coordinata è uguale a 0 oppure no, nel caso dell'uguale o al contrario nel caso di diverso. Sia i nodi di *Start* e *End* convergono sia nel comando *pDecon* e *Cull*, per evitare errori. È possibile cambiare il punto di applicazione variando il *panel* in input del componente *Equals*. Si procede allo stesso modo per il carico centrale e il carico laterale.

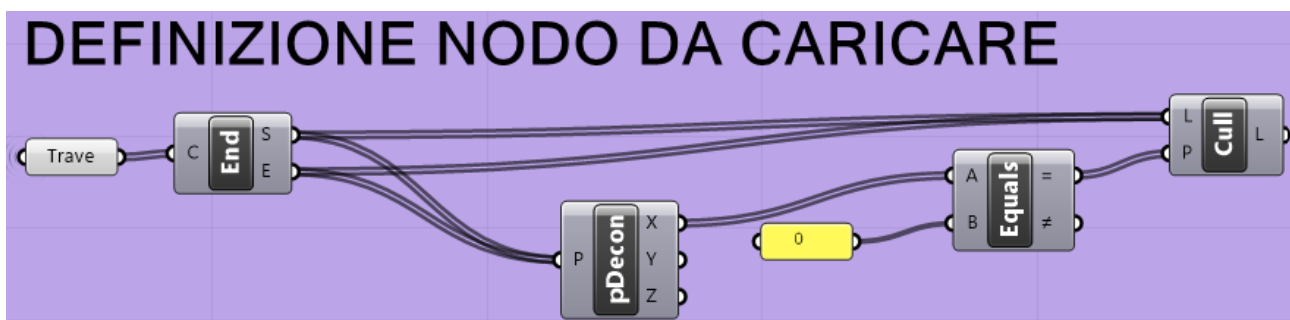


Figura 47 Codice - Definizione nodo di carico

Definiti i nodi, il passo successivo è applicare i carichi. L'analisi viene eseguita combinando i contributi dei carichi verticali (permanenti e variabili) e il carico orizzontale del vento. Il procedimento in *Karamba3D* prevede di creare i tre carichi e di combinarli insieme.

Il peso proprio dei singoli elementi in funzione della sezione sono considerati uniformemente distribuiti su travi, pilastri e controventi. Il software non richiede di calcolare singolarmente il peso, ma è già incorporato all'interno di un blocco. Infatti, nel comando *Loads* di *Karamba3D* è possibile selezionare nel menù a tendina la tipologia del carico *Gravity*. Nell'input *LCase* si definisce il nome con cui il peso proprio viene inserito nella combinazione: si è scelto “g”.

Il carico variabile del vento viene applicato con lo stesso blocco *Loads* usato per il peso proprio. In questo caso, però, la tipologia del carico è *PointLoad*, in modo da applicarlo nei nodi laterali. Gli input cambiano come si può vedere nella Figura 48 Codice - Applicazione dei carichi . Per l'analisi eseguita è sufficiente inserire il valore del carico nell'input *Force*, la posizione dei nodi in cui applicare la forza concentrata in *Pos|Ind* e, di nuovo, il nome usato nella combinazione in *LCase*. Per questo carico, si è scelto il nome “qw”. Il valore della forza applicata può essere inserito con un *panel* con un valore costante oppure direttamente collegato con il file *Excel*. La seconda soluzione consente di calcolare un valore da normativa e più preciso come proposto nel capitolo 3.4.3 e verrà utilizzata nell'analisi d'esempio. Il valore del carico deve essere moltiplicato per il vettore *Unit X*, che ne indica la direzione. Per leggere un foglio, esiste il comando *Read from Excel* che, inserendo gli input corretti, fornisce in output i valori nelle celle sezionate. Gli input richiesti sono:

- “Wb” (Workbook Filepath): connesso con una cella contenente il percorso del file *Excel*.
- “Ws” (Worksheet Name): connesso con un *panel* che indica il nome del foglio del file.
- “R” (Range): connesso con un *Panel* contenente l'intervallo di righe e colonne del file con il formato classico (esempio W6:W12).
- “L” (Live): connesso con il *Boolean Toggle True* per aggiornare i valori automaticamente.
- “_S” (Stream): connesso con il *Boolean Toggle True* per leggere i valori dal file *Excel*.

In output è necessario introdurre un *Flatten* in modo da avere una lista di valori.

Infine, il carico variabile è considerato come uniformemente distribuito sulle travi ed il suo valore solitamente è definito da normativa, come indicato nel capitolo 3.4.2. In *Karamba 3D*, è presente il blocco *Beam Loads*. Nel menù a tendina, si può selezionare la tipologia *Block* per indicare il carico distribuito. All'input *Beam|Id* si collega la lista di travi caricate. Al termine *LCase*, come in precedenza, deve essere connesso il *Panel* con il nome “qv”, carico variabile. Infine, *Force* deve connettersi con il valore del carico, collegato a sua volta con *Unit Z*, che ne indica la direzione.

Definiti i carichi e i valori, bisogna combinarli tra loro. In *Karamba 3D*, esiste il blocco *Load Case Combinator* (LCCombinator), che consente di definire la formula di combinazione:

$$A = \gamma_G G + \gamma_{qw} q_w + \gamma_{qv} q_v \quad (90)$$

In cui A è il nome della combinazione, fondamentale per essere richiamata correttamente nell'analisi; γ_G è il coefficiente che moltiplica il peso proprio; G è il peso proprio di elementi strutturali; γ_{q_w} è il coefficiente che moltiplica il carico del vento; q_w è il carico del vento; γ_{q_v} è il coefficiente che moltiplica il carico variabile; q_v è il carico variabile.

In questo modo vengono introdotti sia la combinazione dei carichi per gli ULS (A) che per gli SLS (B), richiesti per la verifica a spostamento massimo.

Per calcolare il carico finale, è necessario far convergere i tre carichi e il blocco della combinazione, all'interno di una cella *Load* di *Karamba3D*. L'immagine di seguito mostra il codice completo relativo alla parte dell'applicazione dei carichi.

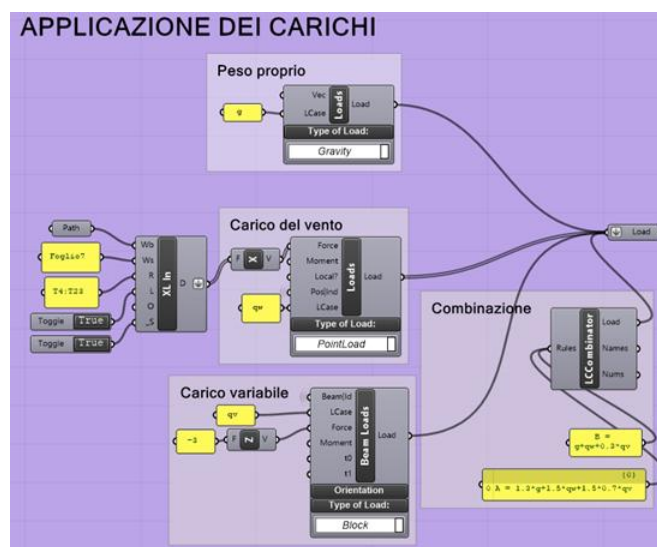


Figura 48 Codice - Applicazione dei carichi

3.5. Assegnazione sezioni e materiale

Fino ad ora, travi, pilastri e controventi sono definiti come linee e non come elementi fisici. Per eseguire questo passaggio è necessario assegnare la sezione e il materiale a tutte le componenti. Il comando suggerito da *Karamba3D* è *LineElem* (Create Linear Element) che richiede in input:

- “Line”: deve essere connesso alla lista di linee che devono essere trasformate in elementi;
- “Colour”: c’è la possibilità di assegnare un colore;
- “Id”: si può assegnare il nome per eventuali verifiche o richiamo con altri comandi. Nell’analisi proposta sono stati assegnati i nomi “CV”, “TR” e “PI”, rispettivamente a controventi, travi e pilastri;
- “CroSec” (Cross Section): contiene la sezione applicata ad un elemento.

La procedura che viene applicata è ripetuta per tutte e tre le tipologie di elementi.

Inizialmente bisogna definire il materiale con il blocco *MatSelect* (Material Selection), che può essere differente per ogni categoria di elemento se hanno materiali diversi, oppure se ne può usare anche solo uno. Manualmente, si seleziona la tipologia (Steel, acciaio per l'obiettivo del programma) e il nome (ad esempio S355, nel caso di acciaio).

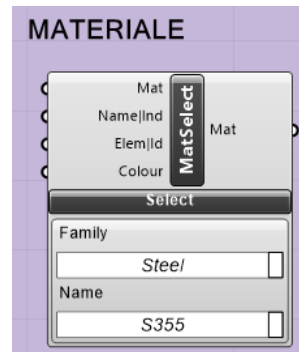
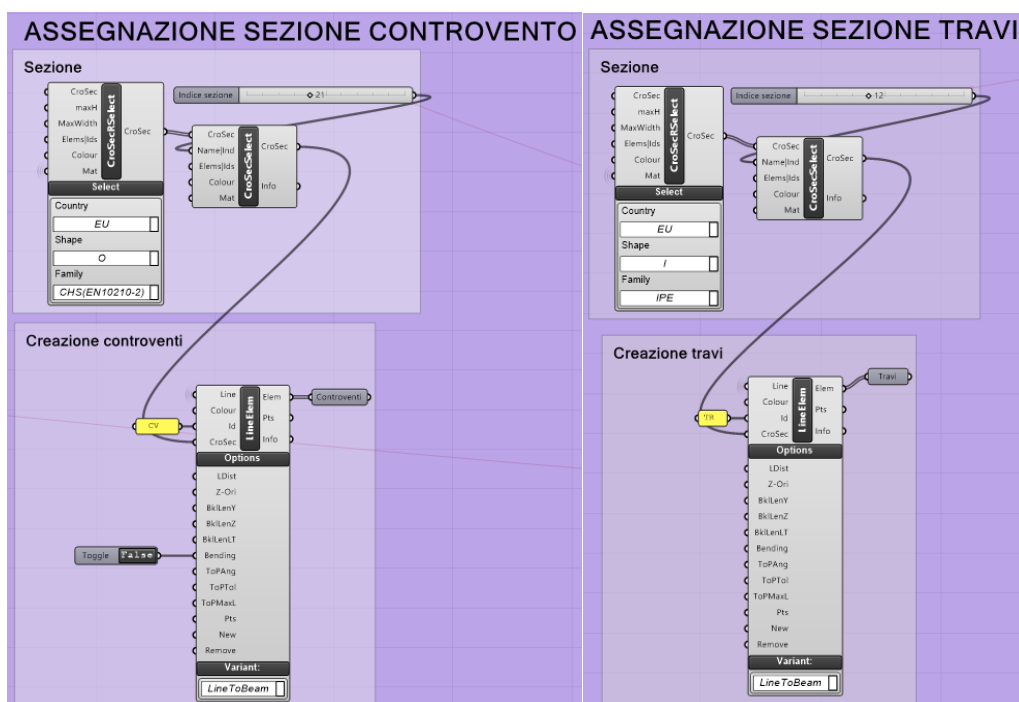


Figura 49 Codice - Definizione materiale

Il materiale è un input del comando che controlla le sezioni, *CroSecRSelect*, Cross Section Range Selector. Questo blocco consente di caricare le proprietà delle sezioni relative al materiale. Bisogna definire il paese, considerando che esistono diverse nomenclature, la forma e, infine, la famiglia. All'interno del menù a tendina è possibile anche selezionare *All*, in modo da non decidere a priori la sezione. Nell'analisi proposta, si è scelto di assegnare famiglie tipiche differenti per travi, pilastri e controventi. L'output risulta essere, quindi, una lista di sezioni limitata definita con la nomenclatura del Paese selezionato. Per selezionare una singola sezione, il comando *CroSecSelect*, Cross Section Selector, deve essere usata, fornendo in input la lista di sezione. Inoltre, per sceglierne solamente una, bisogna usare uno slider connesso con l'input *Name|Ind* che ne fornisce l'indice. Connettendo l'output di questo ultimo blocco con l'input *CroSec* di *LineElem*, si genera l'elemento. La procedura si ripete con tutte e tre le famiglie, con un'unica differenza per i controventi: nella Figura 50 si può vedere che è presente un *Boolean Toggle False*. Esso è connesso con l'input *Bending* in modo da evitare di trasferire il momento sugli elementi travi e pilastri. Questo deriva dalla scelta di analizzare i controventi connessi con delle cerniere, rappresentate con elementi sferici arancioni nella Figura 56. Nel caso si volesse cambiare tipologia di connessione è sufficiente modificare da *False* a *True*.



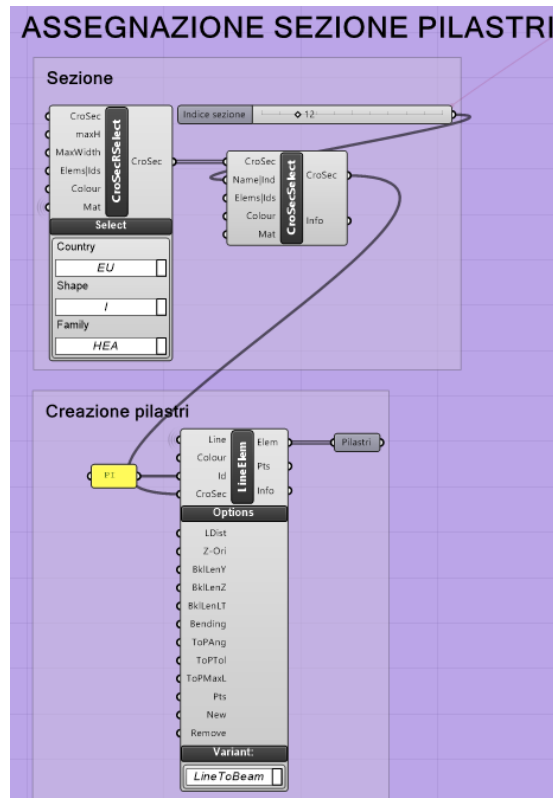


Figura 50 Codice - Assegnazione delle sezioni

Per facilitare l'analisi successiva, le tre famiglie di elementi, travi, pilastri e controventi sono connesse in una lista di liste con il comando *Entwine*. In particolare, è stata selezionata la tipologia *Flatten* per avere i tre elementi divisi in sotto-liste.



Figura 51 Codice - Collezione degli elementi

3.6. Definizione dei vincoli esterni

Ultimo passaggio riguarda la definizione dei vincoli. Mentre i vincoli interni vengono definiti durante la creazione degli elementi, i vincoli esterni richiedono un trattamento specifico. Come per l'applicazione dei carichi, sono necessari due step separati: definizione dei punti in cui applicare i vincoli e definizione della tipologia di supporti. Svolgendo l'analisi in due dimensioni (sul piano XZ), è necessario vincolare tutti i nodi della struttura evitando la traslazione nella direzione Y e rotazione attorno all'asse X e Z. Inoltre, i vincoli posti alla base della struttura devono rispecchiare la configurazione delle cerniere e, quindi, evitare la traslazione in direzione verticale Z.

Per definire la tipologia del vincolo, il software *Karamba 3D* mette a disposizione un blocco chiamato *Supp* (Support). Per l'idea del codice, è sufficiente fornire in input solo la posizione in cui devono essere applicati i supporti. I gradi di libertà bloccati, invece, vengono introdotti selezionando il

singolo spostamento o rotazione possibile (T = traslation, R = rotation). Per ottenere le due tipologie di vincolo, inizialmente, si applicano le restrizioni comuni a tutti. Usando nuovamente il comando *End*, connesso con pilastri e controventi, si ottengono tutti i nodi della struttura. Nel comando *Support* vengono bloccati gli spostamenti come mostrato in Figura 53 Definizione dei vincoli (Supp 1). I vincoli reali della struttura solo quelli alla base, aventi la coordinata Z uguale a 0 (Figura 53 Definizione dei vincoli - Supp 2). Collegando i punti di estremità ottenuti in precedenza con il comando *Equals* e successivamente *Cull*, si ricavano i nodi di base. Ad essi si aggiunge il blocco per la traslazione in direzione Z e X.

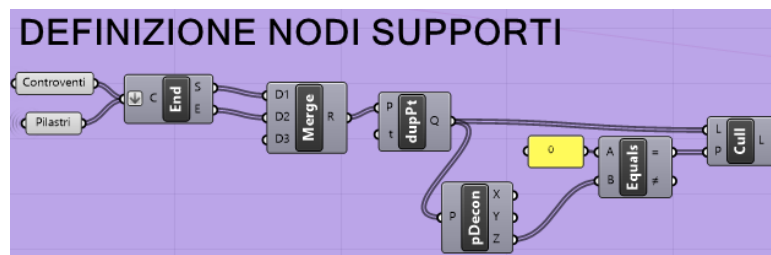


Figura 52 Codice - Definizione dei nodi

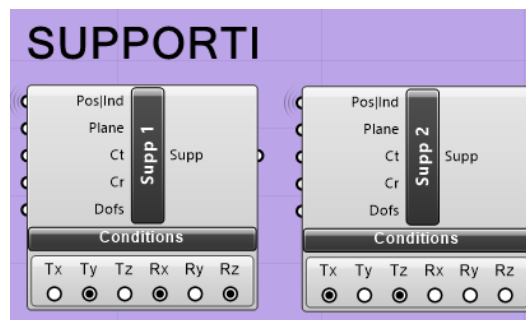


Figura 53 Definizione dei vincoli

3.7. Analisi della struttura

Definiti tutti gli elementi necessari per l'analisi, bisogna connettere tutte le proprietà tra loro. *Karamba 3D* mette a disposizione il comando *Assemble*, in cui tutte le proprietà ed elementi convergono. Esso vuole in input:

- “Elem” (Elements): in cui convergono travi, pilastri e controventi trasformati in elementi (output del comando *Entwine*);
- “Support”: collegato con il blocco che definisce i vincoli;
- “Load”: collegato con il blocco che definisce i carichi;
- “Joint”: collegato con il blocco che definisce i vincoli interni (non usato in questo caso).

Tutte queste proprietà vengono assemblate e presenti all'interno dell'output *Model*. Questo blocco fornisce, inoltre, la massa dell'intera struttura *Mass*.

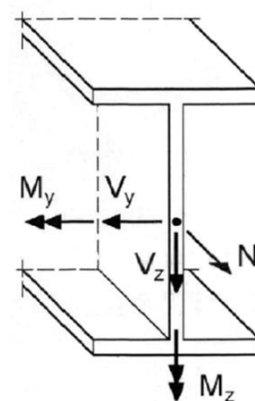
A questo punto il modello strutturale è pronto per l'elaborazione. Per eseguire l'analisi, invece, è presente un comando *Analyse* che esegue in modo automatico i calcoli senza dover attivare manualmente il processo quando cambiano le proprietà (come capita ad esempio in SAP2000). Il blocco calcola la risposta meccanica per ogni combinazione possibile e aggiunge le informazioni al modello. In input, il comando richiede il modello generato e l'input *LoadCases* che consente di selezionare le combinazioni di carico da considerare nell'analisi. Il componente *Analyse* restituisce lo spostamento nodale massimo in centimetri (*MaxDisp*), la forza risultante massima delle combinazioni di carico considerate in kN (*Force*) e l'energia di deformazione interna della struttura in kNm (*Energy*). La freccia massima e l'energia elastica sono entrambi parametri di riferimento per la rigidezza struttura da due punti di vista diversi: il valore dell'energia elastica consente di valutare una struttura nel suo complesso, mentre lo spostamento massimo un valore di picco locale.

Per visualizzare la deformata e i risultati complessivi della struttura, bisogna usare il componente *ModelView*, un sottocomponente della sezione *Results*. Questo controlla le proprietà di visualizzazione generali del modello strutturale. Il menù sottostante *Display* contiene caselle di controllo e cursori per abilitare/disabilitare e scalare spostamenti, forze di reazione sui vincoli, simboli di carico, simboli di vincoli, sistemi di coordinate locali e simboli per i giunti alle estremità degli elementi. Il menù *Annotations*, invece, consente di attivare informazioni testuali relative al modello, come gli indici dei nodi (*Node numbers*), gli indici degli elementi (*Element numbers*), gli identificatori degli elementi (*Element tags*) ed altri.

Per gestire la visualizzazione delle travi, *Karamba 3D* suggerisce il comando *BeamView*. Fornendo in input il modello generato con il componente *Analyse*, si possono visualizzare le forze della sezione trasversale, gli spostamenti risultanti, il rapporto sforzo/resistenza dei materiali, lo sforzo assiale e la lunghezza di instabilità. Il sottomenù *Section Forces* consente di attivare la visualizzazione le forze e i momenti di sezione. La rappresentazione grafica è orientata secondo gli assi coordinati locali della trave. L'indice dei momenti indica l'asse attorno al quale la rotazione è considerata. Il sottomenù *Display*, invece, fornisce diverse possibilità per il rendering degli assi delle travi. Come si può vedere nella Figura 55 Codice - Analisi struttura, si possono attivare differenti opzioni:

- *Cross section*: consente di visualizzare la sezione degli elementi sul modello;
- *|Disp|-CroSec*: visualizza una rappresentazione a colori degli spostamenti assoluti in funzione della sezione trasversale;
- *|Disp|-MidAxis*: simile al precedente, ma meno dettagliato;
- *Stress/Strength Ratio*: fornisce una visualizzazione a colori del rapporto tra sforzo assiale e resistenza del materiale senza considerare effetti di taglio e instabilità;
- *Axial stress*: visualizzazione a colori dello sforzo assiale;

- Per ottenere la lista degli sforzi sulle singole aste, è possibile usare il componente B-Forces (Beam Forces). Fornendo in input il modello generato con il blocco *Analyse*, si ottengono i valori dello sforzo normale, i momenti flettenti Y e Z, i momenti torcenti e i tagli in direzione Y e Z. I segni fanno riferimento al lato positivo della sezione della trave, ovvero orientato come nella Figura 54. Per ognuna delle sollecitazioni in output, vengono forniti il doppio del numero delle aste perché presenta i valori alle estremità degli elementi. Infatti, i risultati si presentano come una lista di sottoliste di due valori.



Di seguito viene riportato la parte di codice descritta e un esempio di risultato di un telaio standard.

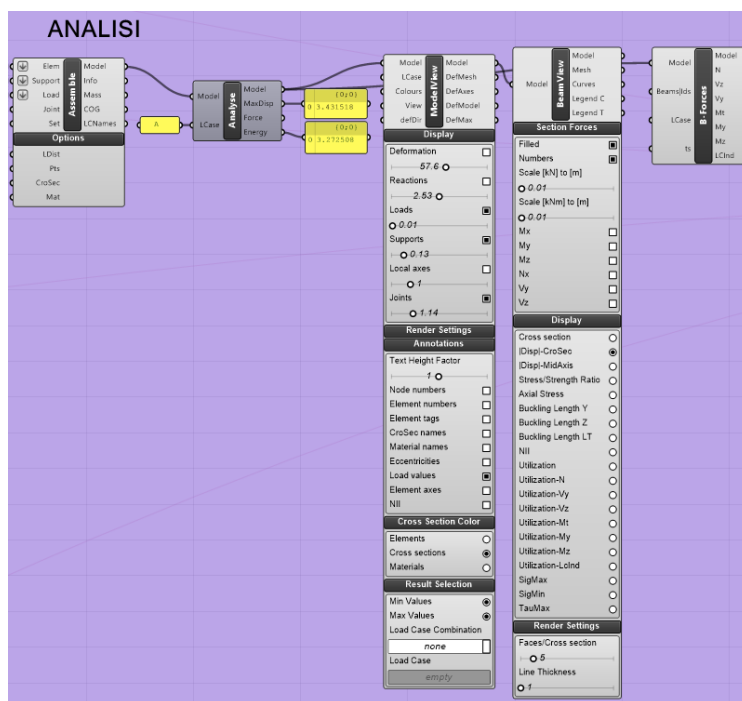


Figura 55 Codice - Analisi struttura

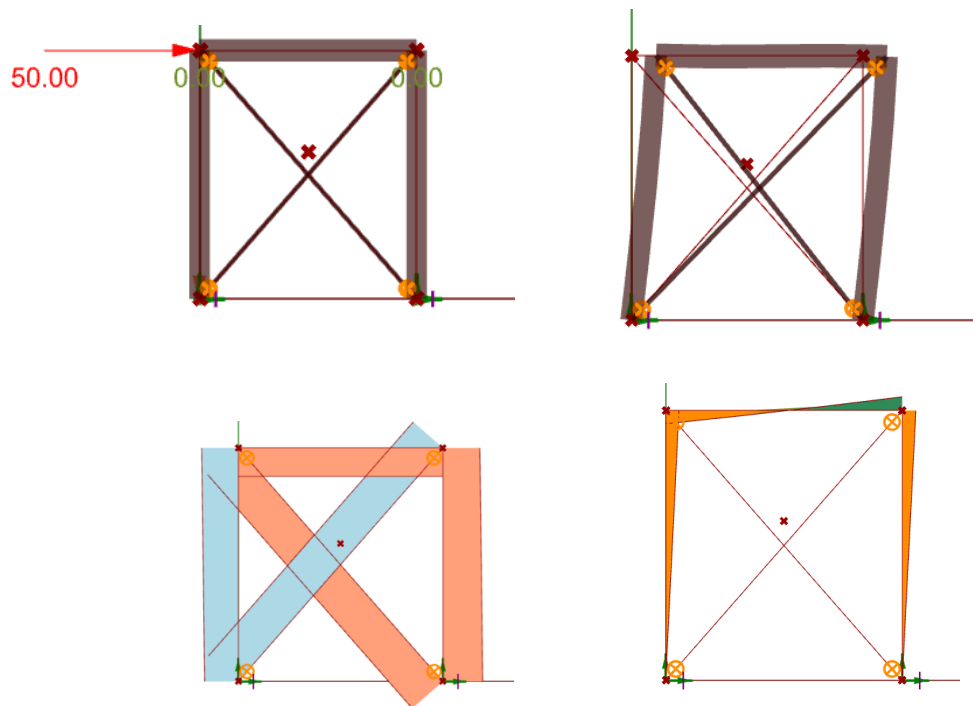


Figura 56 Rhino - Risultati analisi

Karamba 3D mette a disposizione anche un'analisi del secondo ordine: *AnalyseThll*. Esso lavora con lo sforzo normale che genera effetti del secondo ordine N^{II} . In questo modo, è possibile verificare se la struttura non soffre problemi di instabilità globale. Nel caso in cui la verifica non fosse soddisfatta, il modulo da un warning e segnala quali tipi di modi non sono stabili. Questo passaggio è eseguito sia nella prima fase di ottimizzazione con solutore *Galapagos* che con *Optimize Cross Section*.

3.8. Confronto risultati FEM (SAP2000)

Conclusa la scrittura della prima parte del programma con l'analisi della struttura, è necessario verificare che il codice dia i risultati corretti. Si è deciso di usare il software commerciale SAP2000, che consente di analizzare il telaio assegnando le sezioni e le proprietà necessarie. Realizzando la stessa struttura in entrambi i programmi si convalida il codice scritto. Analizzando diverse tipologie di controventi, si è deciso di confrontare tutte le configurazioni, mantenendo uguale il numero di modulo e di piani. Inoltre, è stata assegnata una sezione d'esempio per ogni elemento costitutivo rimasta costante durante le diverse analisi e un carico costante di 50 kN sommato al peso proprio della struttura.

PROPRIETA' STRUTTURA		
n° piani	5	[-]
n° moduli	4	[-]
Altezza piano	4,0	[m]
Larghezza modulo	3,5	[m]
Sezione trave	IPE300	[-]
Sezione colonna	HEA340	[-]
Sezione controvento	CHS76.1x3.2	[-]
Numero elementi	55	[-]

Tabella 19 Validazione codice - Proprietà struttura

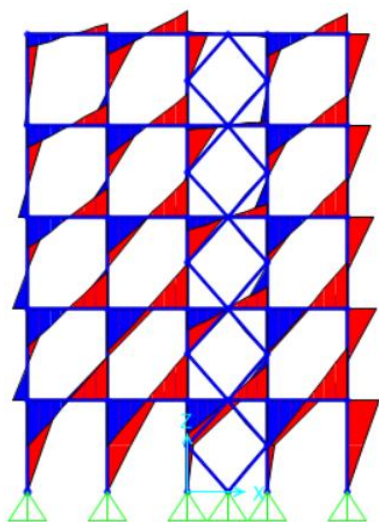
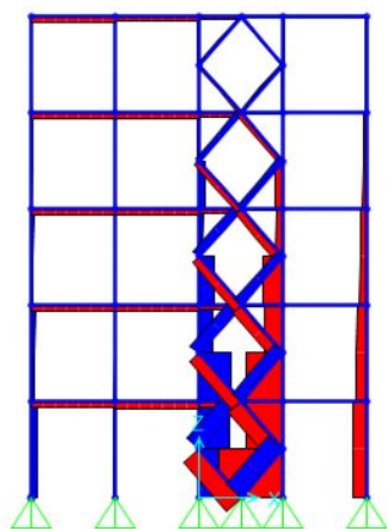
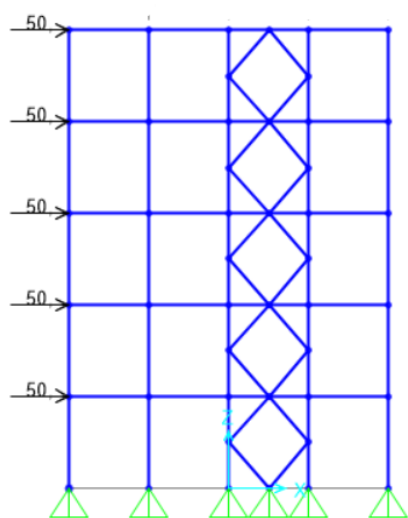
Per ogni tipologia di controvento vengono riportati solo gli errori massimi e i grafici, mentre i valori generali sono riassunti nell'*Appendice A*. Come si possono vedere dalle tabelle gli errori percentuali massimi sono molto bassi, riconducibili ad errori numerici. Di conseguenza, si può dire che il codice è validato.

Tipologia	errore %		
	N	M+	M-
a K	2,56%	0,72%	0,91%
a \	2,84%	1,79%	0,64%
a /	1,79%	2,38%	1,28%
a V	1,30%	1,71%	1,59%
a V rovescia	1,86%	0,97%	0,48%
a X	2,60%	0,73%	1,18%

Tabella 20 Validazione codice - Errori %

3.8.1. Controvento a K

SAP2000



KARAMBA3D

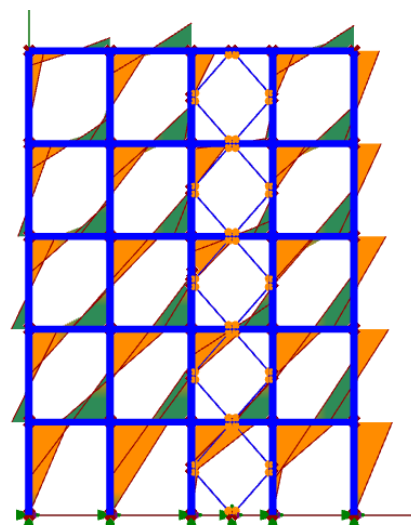
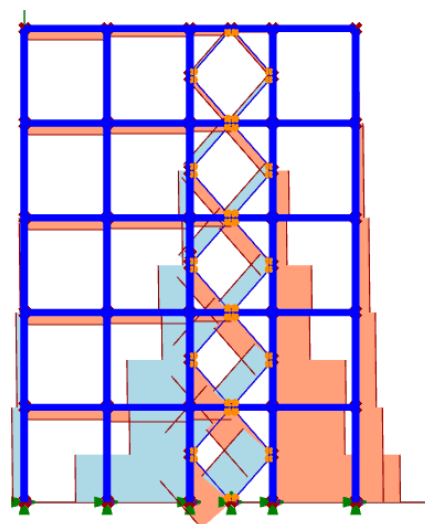
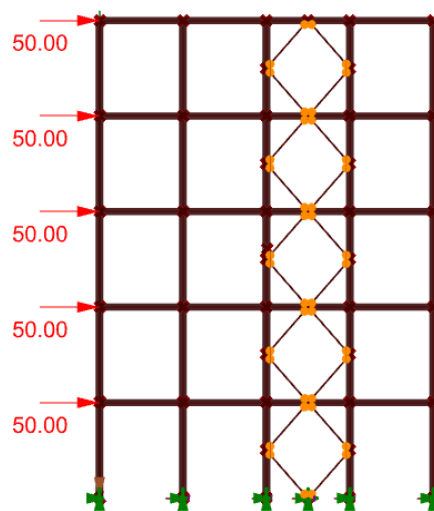
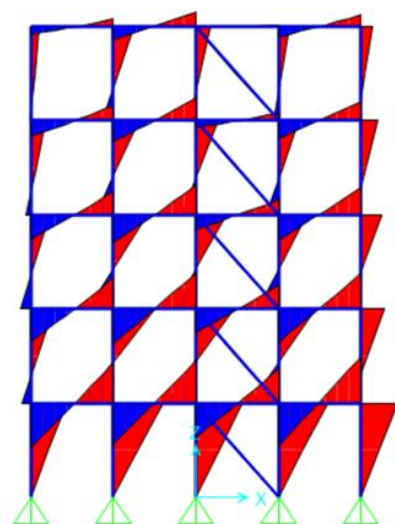
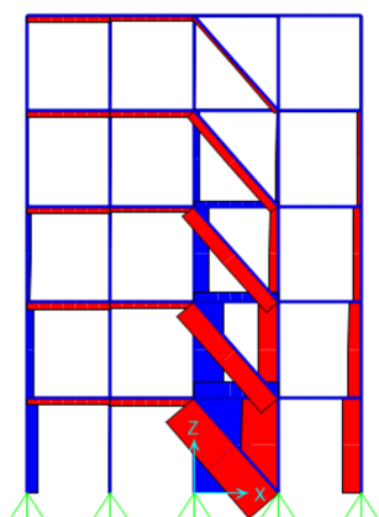
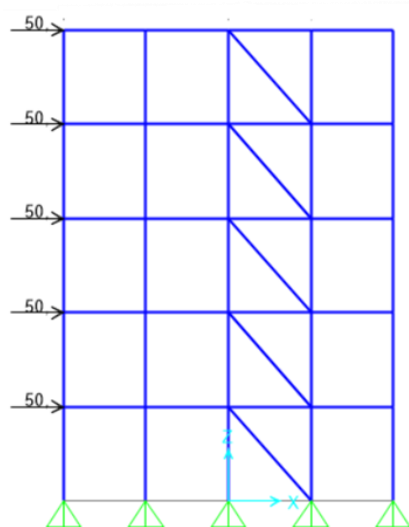


Figura 57 Validazione - Controventi a K (carichi, sforzo normale, momento)

3.8.2. Controvento a diagonale compressa

4. SAP2000



KARAMBA3D

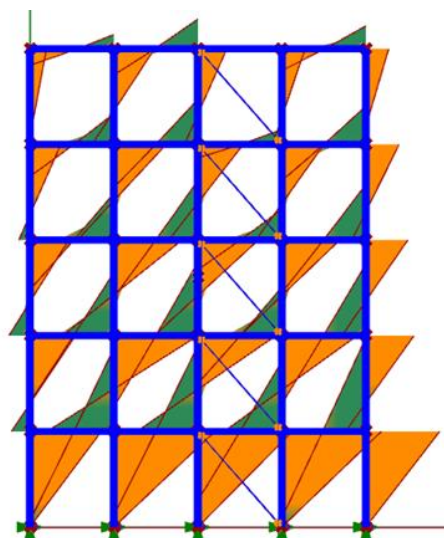
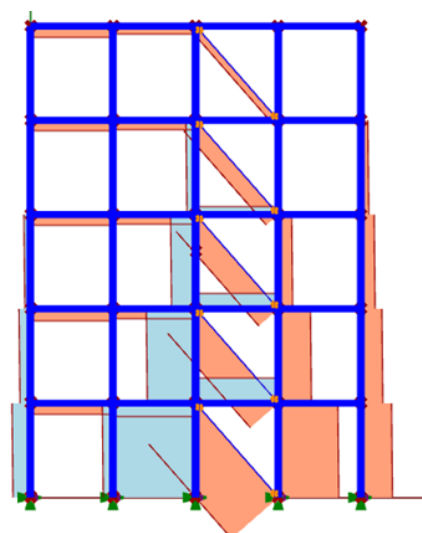
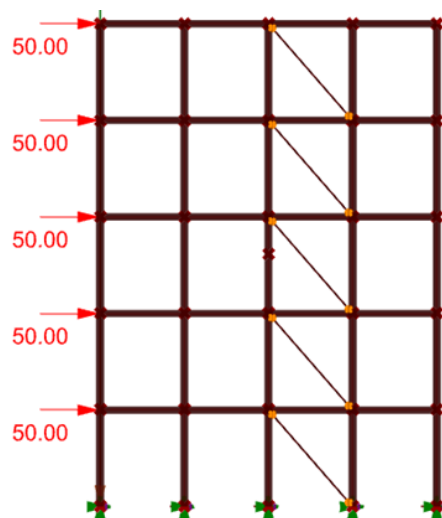
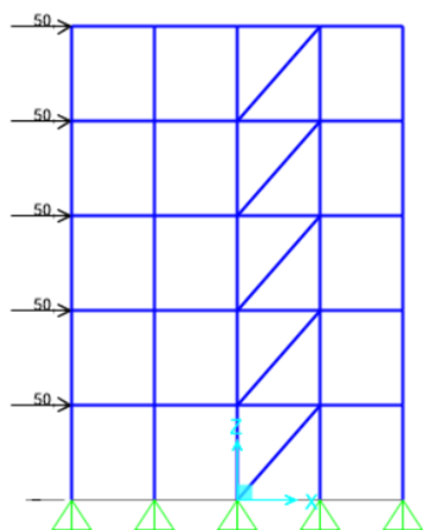


Figura 58 Validazione - Controventi a diagonale compressa (carichi, sforzo normale, momento)

3.8.3. Controvento a diagonale tesa

4. SAP2000



KARAMBA3D

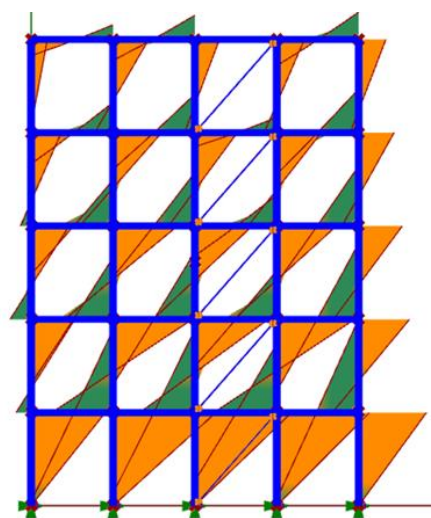
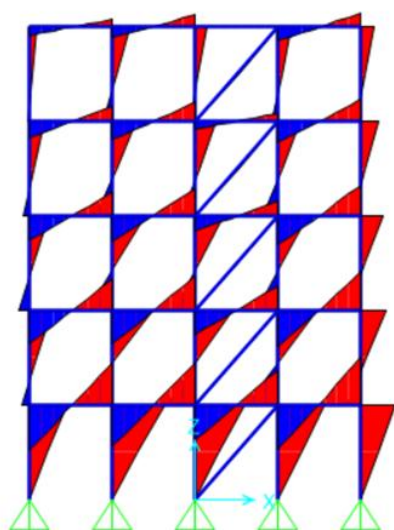
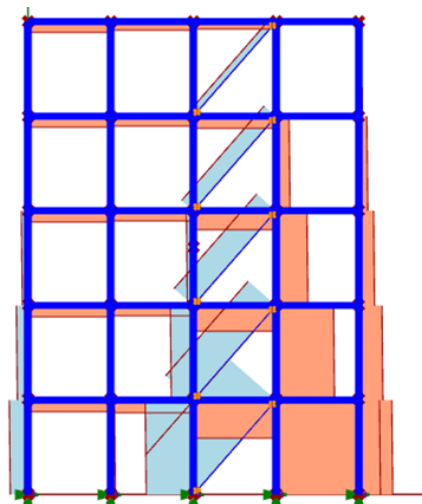
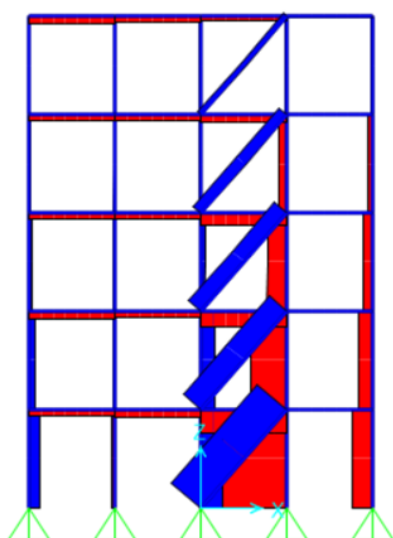
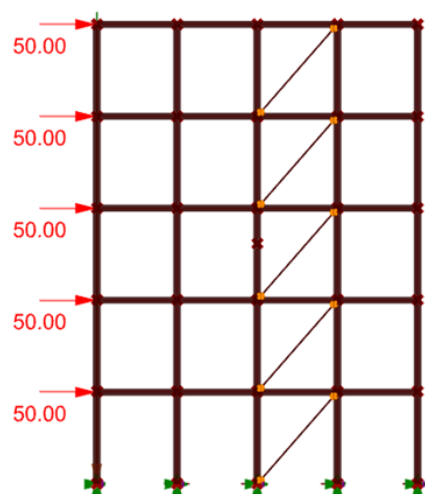
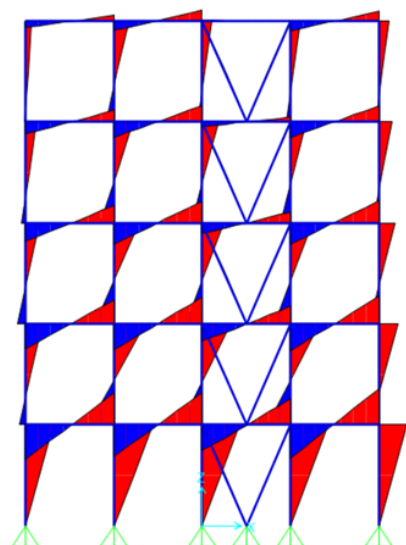
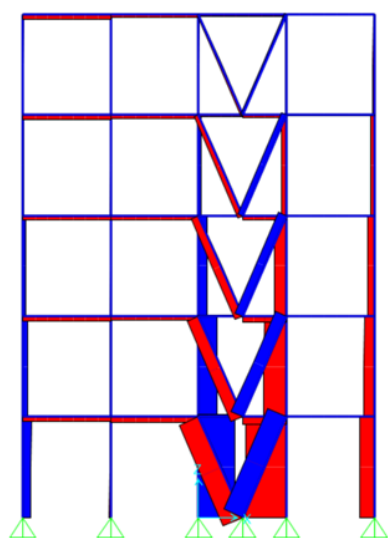
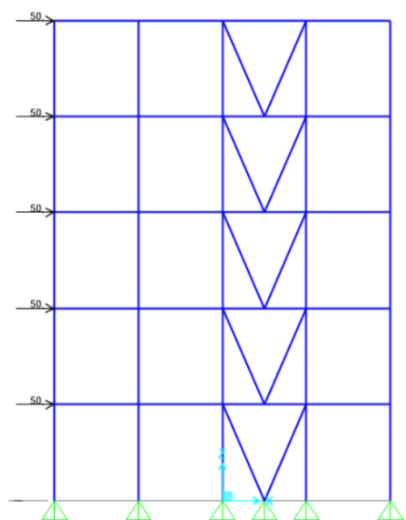


Figura 59 Validazione - controventi a diagonale tesa (carichi, sforzo normale, momento)

3.8.4. Controvento a V

SAP2000



KARAMBA3D

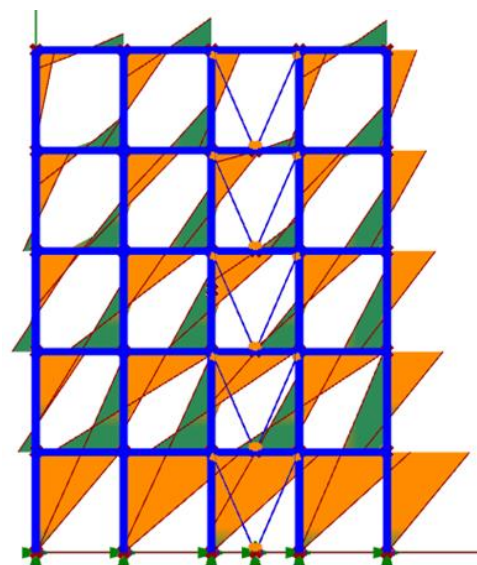
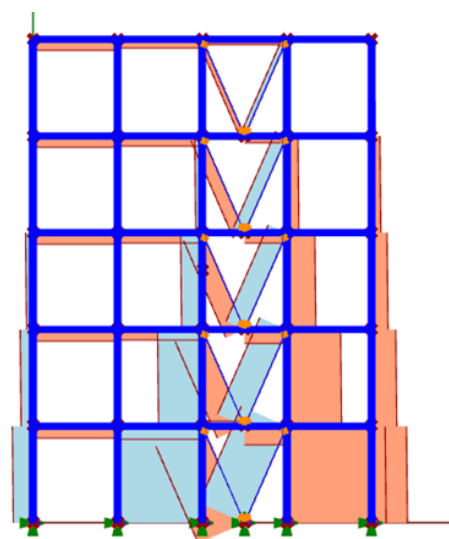
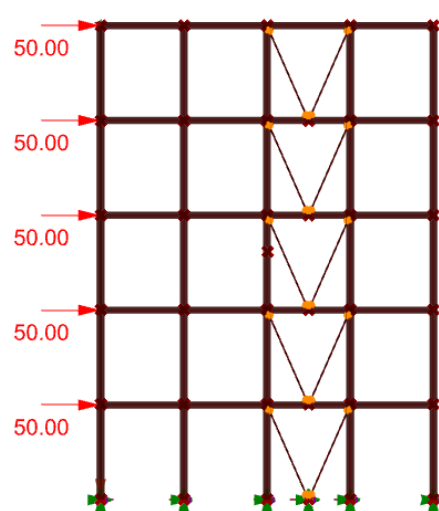
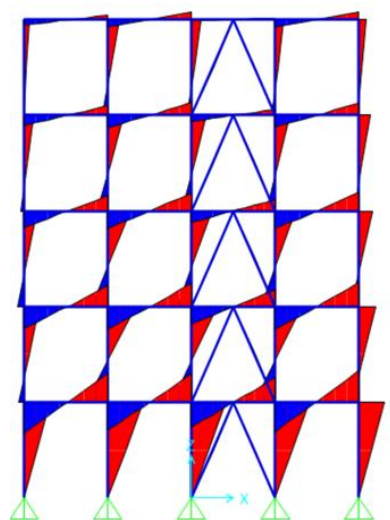
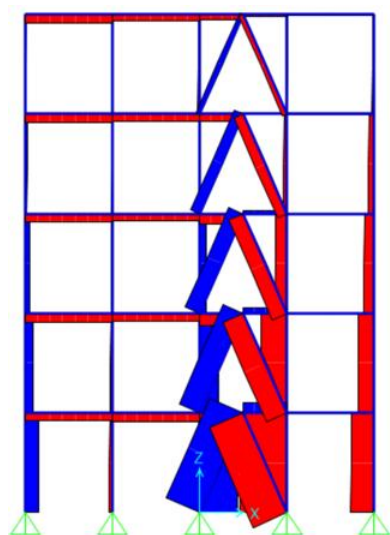
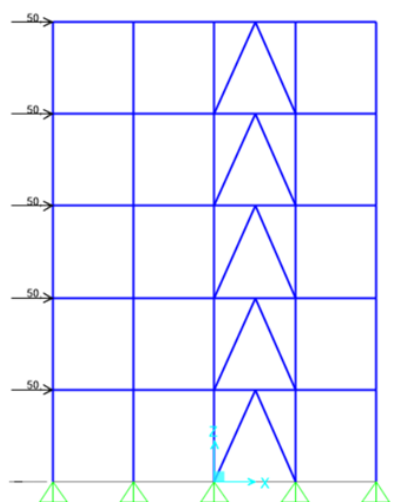


Figura 60 Validazione - Controvento a V (carichi, sforzo normale, momento)

3.8.5. Controvento a V rovesciata

SAP2000



KARAMBA3D

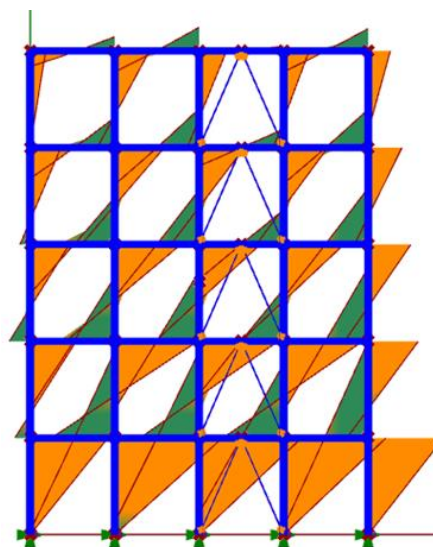
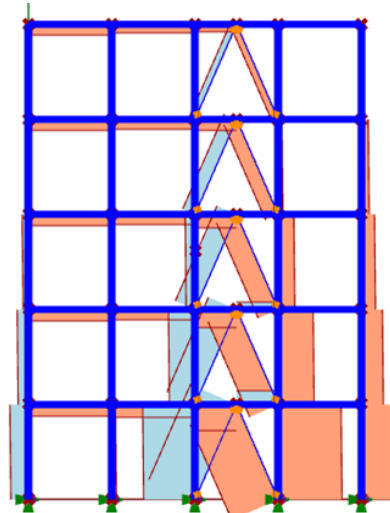
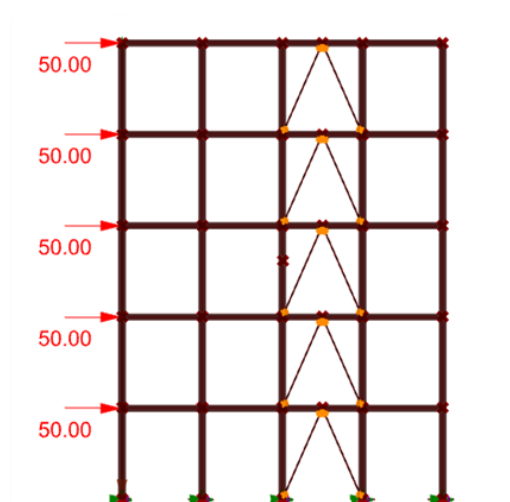
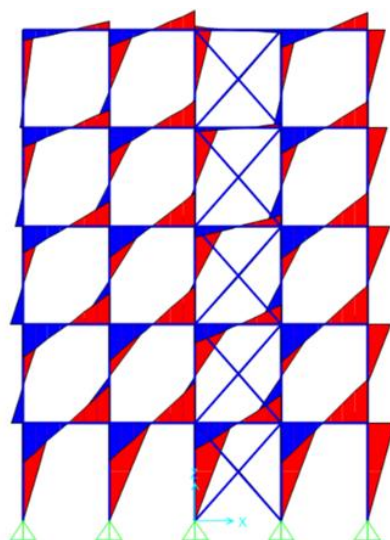
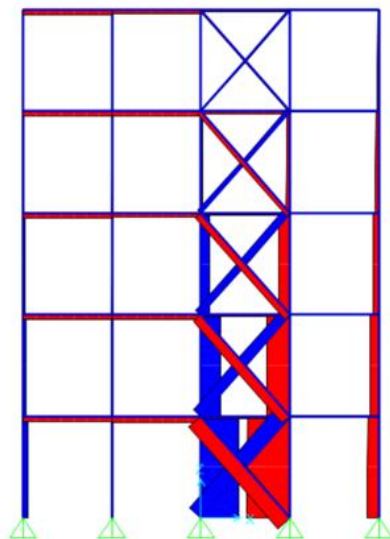
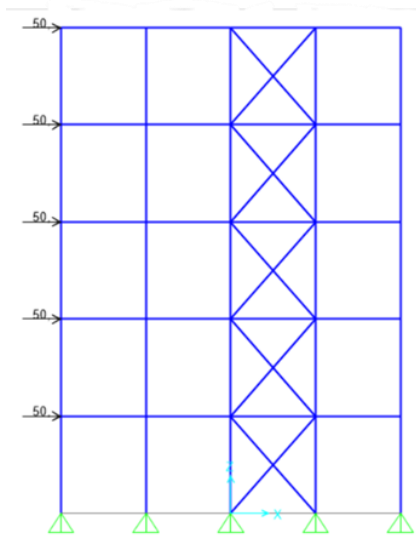


Figura 61 Validazione - Controvento a V rovesciata (carichi, sforzo normale, momento)

3.8.6. Controvento a X

SAP2000



KARAMBA3D

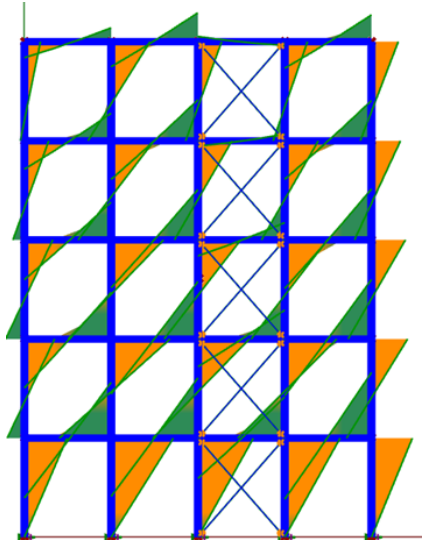
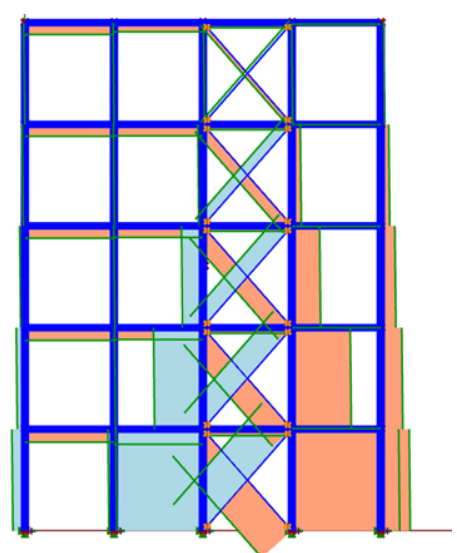
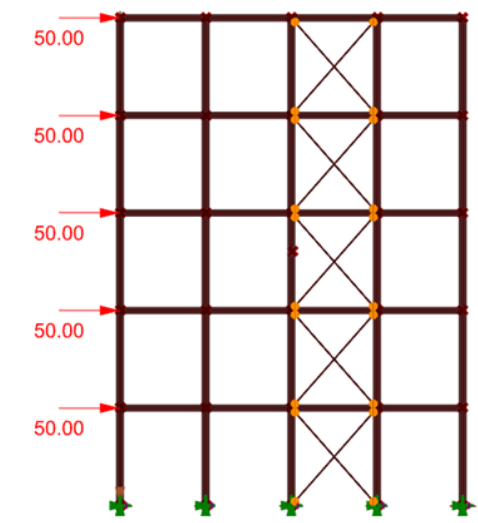


Figura 62 Validazione - Controvento a X (carichi, sforzo normale, momento)

CAPITOLO 4 – OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA EVOLUTIVA

Al fine di ottenere un risultato che rispetti i requisiti richiesti dall'Eurocodice 3 e NTC 2018 e che rappresenti le esigenze strutturali, si è deciso di eseguire un'ottimizzazione topologica strutturale. Come già accennato in precedenza, si lavora con un ottimizzatore evolutivo, *Galapagos*. A questo segue l'introduzione del modulo *Optimize Cross Section*. Con la prima fase di ottimizzazione, sono state proposte due alternative: fissare la disposizione dei controventi e determinare la miglior configurazione oppure impostare la tipologia di controvento (ad esempio a X) ed ottenere la miglior disposizione delle aste. In entrambe le proposte si definisce anche la miglior sezione del gruppo travi, gruppo pilastri e gruppo controventi. Lavorare con sezioni differenti per ogni elemento in un design parametrico è molto complicato. Di conseguenza la scelta è ricaduta sull'idea di lavorare per gruppi di elementi simili. Oltre ad un'ottimizzazione topologica viene eseguita anche un'ottimizzazione dimensionale. Le sezioni degli elementi sono ottenute anche con il componente *Optimize Cross Section*. Questo modulo è disponibile in *Karamba 3D*. Anche per questo passaggio sono state proposte due soluzioni: lavorare per gruppi di elementi simili (sempre travi, pilastri e controventi) oppure assegnare una sezione disponibile per ogni elemento. Di seguito viene spiegato il funzionamento di entrambi i componenti nel dettaglio.

4.1. Funzionamento solutore evolutivo (Galapagos)

Un solutore evolutivo è uno strumento di ottimizzazione che funziona con un ciclo di selezione, crossover e mutazione per trovare la soluzione ottimale. Per spiegare il processo correttamente è necessario seguire in ordine le immagini riportate, in cui si presentano le distribuzioni della popolazione nelle diverse fasi. I fotogrammi rappresentano il Fitness Landscape a due variabili (nella realtà posso essere molti di più e, quindi non rappresentabili), ovvero valori che cambiano durante l'ottimizzazione e vengono definiti come geni. Ad esempio, variando il Gene A si possono ottenere soluzioni migliori o peggiori. Allo stesso tempo è possibile variare anche il Gene B e la loro combinazione consente di avere miglioramenti o peggioramenti della soluzione ottimale. Ogni combinazione dei due geni risulta essere in un particolare punto della superficie e la loro fitness function viene visualizzata con l'altezza della superficie. Trovare il massimo è il compito dell'algoritmo. Al primo step, il solutore popola la superficie con un insieme casuale di individui, ovvero combinazioni, il cui termine tecnico è genoma. Per ognuno di essi, il solutore calcola la fitness function e fornisce la distribuzione proposta nella Figura 63. Volendo cercare genomi che garantiscono la fitness function migliore e quindi raggiungere la massima altezza, si possono eliminare quelli con le prestazioni peggiori. Essi corrispondono ai genomi più bassi. La Figura 64 mostra la distribuzione ottenuta. Nella prima generazione, però, lo spazio è stato popolato in modo casuale e, quindi,

difficilmente sarà il risultato ottimale. Il passaggio successivo sarà creare la Generazione 1, incrociando i genomi più performanti ottenendo nuove distribuzioni (Figura 65). A questo punto si procede iterando, fino ad ottenere le soluzioni più vicine ai tre picchi, eliminando i genomi meno performanti (Figura 66).

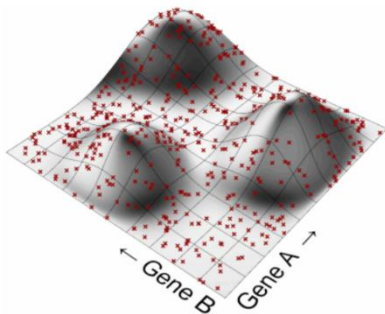


Figura 63 Distribuzione 1

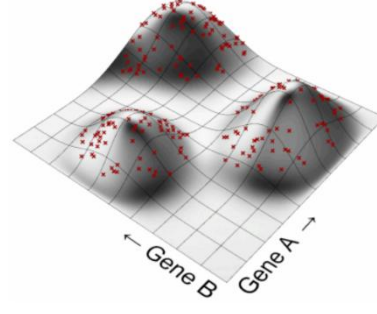


Figura 64 Distribuzione 2

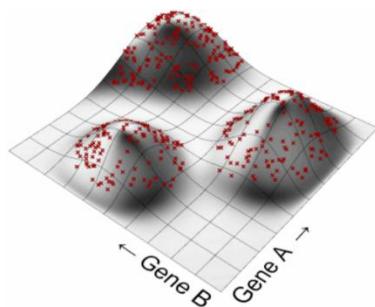


Figura 65 Distribuzione 3

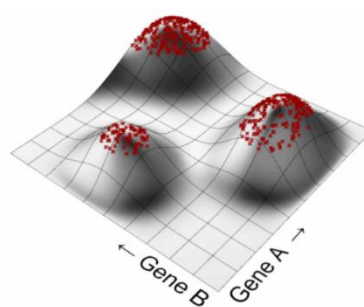


Figura 66 Distribuzione 4

Il processo richiede in input alcuni elementi chiave: Fitness function, Selection Mechanism, Coupling Algorithm, Coalescence Algorithm, Mutation Factory. (in italiano: funzione obiettivo, meccanismo di selezione, algoritmo di accoppiamento, algoritmo di coalescenza e fattore di mutazione). Brevemente, i parametri si possono definire come:

- Fitness function è una funzione che serve a valutare la qualità di una soluzione in un problema di ottimizzazione;
- Meccanismo di selezione è il metodo con la quale vengono scelte le soluzioni da accoppiare. Una soluzione tipica è la selezione isotropica, che è l'algoritmo in cui tutti possono accoppiarsi. Un altro esempio è la selezione esclusiva in cui solo la percentuale più alta di popolazione può accoppiarsi. Infine, un terzo esempio è la selezione distorta in cui la probabilità di accoppiamento cresce progressivamente con la fitness function.

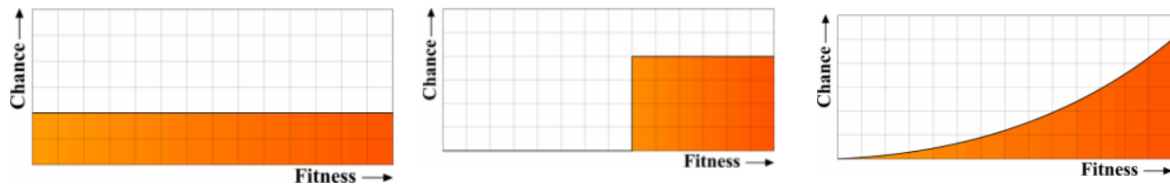


Figura 67 Probabilità di accoppiamento

- Algoritmo di accoppiamento è necessario per la scelta del partner. Sulla mappa dei genomi che rappresenta una popolazione su una griglia, la distanza è molto simile alla distanza tra i genomi nello spazio. Partendo da questo presupposto, da un punto si possono prendere tutti i punti molto vicini oppure prendere solo i punti molto lontani. Entrambe le soluzioni non soddisfano le esigenze in genere e la soluzione migliore è bilanciare la scelta (valori non troppo vicini ma neanche troppo lontani).
- Algoritmo di coalescenza serve per generare la nuova soluzione a seguito dell'accoppiamento.
- Fabbriche di mutazioni sono elementi utili per introdurre diversità tra gli elementi. La mutazione usata da *Galapagos* è la mutazione puntiforme in cui viene modificato un solo valore del gene. Esiste anche la mutazione di inversione in cui si scambiano i valori di due geni.

4.2. Definizione matematica

L'ottimizzazione prevede di determinare la configurazione ottimale dei controventi tra una lista di tipologie prestabilite che rende l'analisi discreta. A questo si aggiunge la scelta della famiglia di sezioni per le travi, pilastri e controventi (una unica per ogni gruppo di elementi). Anche le sezioni vengono determinate tra un insieme finito di sezioni disponibili. L'obiettivo è sempre quello di minimizzare la massa, rispettando i vincoli geometrici e strutturali dell'elemento.

Dal punto di vista analitico, nel caso di ottimizzazione a singolo obiettivo, la formulazione generale è:

$$\min f(x) \quad (91)$$

Soggetto a:

$$\begin{aligned} g_i(x) &\geq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \\ S_T, S_P, S_C &\in S; c \in C \end{aligned} \quad (92)$$

Dove $g_i(x)$ rappresentano i vincoli strutturali (resistenza a trazione, instabilità a compressione, interazione compressione e momento flettente, spostamento massimo); S e C sono i vincoli discreti (S è l'insieme sezioni disponibili; C è l'insieme delle tipologie di controvento disponibile); x è il vettore che contiene tutte le variabili possibili:

$$x = [s_T, s_P, s_C, c]$$

s_T è la sezione delle travi, s_P è la sezione dei pilastri, s_C è la sezione dei controventi e c è la tipologia di controvento.

La funzione massa $M(x)$ viene definita nel seguente modo:

$$M(x) = \sum_{j=1}^N m_j = \sum_{j=1}^N \rho A_j L_j \quad (93)$$

Dove N è il numero di elementi che costituiscono il telaio (numero di travi + numeri di pilastri + numero di elementi che costituiscono i controventi), m_j è la massa del singolo elemento, ρ è la densità dell'acciaio, A_j è l'area dell'elemento e L_j è la lunghezza dell'elemento.

La funzione obiettivo della prima fase dell'ottimizzazione (FO) è definita così:

$$FO = \min (M_{corretta}(x)) = M(x) * (1 + k * g) \quad (94)$$

In cui $M_{corretta}$ è la massa che tiene in conto delle penalità (penalty function) g , qualora una verifica non venisse rispettata; M è la massa della struttura senza alcuna penalità; k è il fattore correttivo per amplificare le funzioni penalità (fissato pari a 100); g è la somma delle penalty functions. È definita nel seguente modo:

$$g = \sum_{i=1}^N g_i \quad (95)$$

Dove N è il numero di vincoli impostati e g_i è il singolo vincolo. Al fine di rispettare le verifiche richieste dall' EN 1993-1-1, sono state inserite 4 penalty functions (i=1:4):

- 1) Verifica a trazione dell'elemento secondo UNI EN 1993-1-1, §6.2:

$$g_1 = \frac{N_{ed,t}}{N_{rd,t}} - 1 \quad (96)$$

In cui $N_{rd,t}$ è calcolato seguendo il procedimento indicato nel capitolo 2.3.1.

- 2) Verifica instabilità sotto sforzo assiale di compressione secondo UNI EN 1993-1-1 , §6.3.1.1:

$$g_2 = \frac{N_{ed,c}}{N_{rd,c}} - 1 \quad (97)$$

In cui $N_{rd,c}$ è calcolato seguendo il procedimento indicato nel capitolo 2.3.2, tenendo in conto delle imperfezioni e della possibile instabilità della sezione.

- 3) Verifica di interazione tra lo sforzo assiale di compressione e lo sforzo determinato dal momento flettente. Si è deciso di usare la formula semplificata presente al capitolo 2.3.3:

$$g_3 = \frac{Ned,c}{Nrd,c} + \frac{Med,y}{Mrd,y} + \frac{Med,z}{Mrd,z} - 1 \quad (98)$$

In cui Mrd,y e Mrd,z è calcolato seguendo il procedimento indicato nel capitolo 2.3.3.

- 4) Verifica dello spostamento massimo secondo EN 1993-1-1 e NTC 2018:

$$g_4 = \frac{\delta_{max}}{\delta_{lim}} - 1 \quad (99)$$

In cui δ_{max} è lo spostamento orizzontale massimo definito dall'analisi strutturale e δ_{lim} è il valore imposto come definito nel paragrafo 2.3.4.

Effettivamente guardando le formulazioni di g_2 e g_3 , sono molto simili. Qualora si analizzasse un elemento che non è soggetto a momento si ottengono gli stessi risultati avendo Med,y e Med,z pari a zero. Si è deciso di inserire separatamente i due problemi per valutare innanzitutto quale configurazione genera problemi di instabilità flessione e, inoltre, per penalizzare maggiormente quella distribuzione. Per il calcolo delle funzioni di penalità g_3 , la scelta è ricaduta sulla formulazione semplificata, perché altrimenti l'utilizzo della classica formula della verifica flesso-torsionale degli elementi avrebbe richiesto un codice molto complesso da gestire variando continuamente la sezione e la distribuzione dei momenti.

4.3. Procedimento

Questo primo step dell'ottimizzazione viene gestita usando l'ambiente *Grasshopper* sfruttando la scrittura di un codice Python e del plug-in *Galapagos*. Il codice Python calcola la funzione di massa da minimizzare a partire dalla massa degli elementi e introducendo i valori delle funzioni di penalità. Il codice Python viene introdotto con il componente *Python 3 Script* che richiede in input i seguenti dati:

- “Massa”: la massa viene calcolata automaticamente con il componente *Assemble*.

- “Materiale”: questo elemento è collegato direttamente con il materiale scelto con il componente *Material Selection* che ne definisce le proprietà.
- “Cross_Section_trave”, “Cross_Section_bracing” e “Cross_Section_colonna”: contiene le proprietà della sezione degli elementi trave, colonna e controvento (bracing) ed è collegato con il componente *Cross Section Selector*.
- “N” e “My”: contiene lo sforzo assiale e il momento flettente attorno all’asse y-y ottenuto a seguito dell’analisi strutturale con il componente *Beam-Forces*. (essendo un’analisi 2D, M_z è pari a zero).
- “nb”, “nc” e “nt”: contengono il numero di travi, controventi e pilastri, utili per generare vettori di dimensioni corrette.
- “Max_delta”: contiene lo spostamento massimo che viene definito nell’analisi strutturale con il componente *Analyse*.
- “Lunghezza_buckling_y”, “Lunghezza_buckling_z”: contengono le lunghezze libere di inflessione dei singoli elementi. Questi sono ottenute disassemblando prima il modello generato e successivamente ripetendo lo stesso procedimento con l’elemento *beam*. Come output, il componente *Disassemble Element* fornisce proprio la lunghezza libera di inflessione. Questa viene utilizzata nella verifica di instabilità a compressione dell’elemento.
- “alfa_y_trave”, “alfa_y_bracing”, “alfa_y_colonna”, “alfa_z_trave”, “alfa_z_bracing”, “alfa_z_colonna”: contengono il valore α , fattore di imperfezione che deriva dalle curve di instabilità secondo la Tabella 6.1 dell’EN 1993-1-1. Essi sono funzione della sezione e vengono ottenute dal componente *Disassemble Cross Section*.
- “Wely_trave”, “Wely_bracing”, “Wely_pilastro”, “Welz_trave”, “Welz_bracing”, “Welz_pilastro” sono i moduli di resistenza usati per la verifica a momento flettente. È stato scelto quello elastico per questione di sicurezza ed è ritenuto sufficiente nel primo step. Nel secondo, viene tenuto in considerazione del valore corretto in base alla classificazione della sezione.

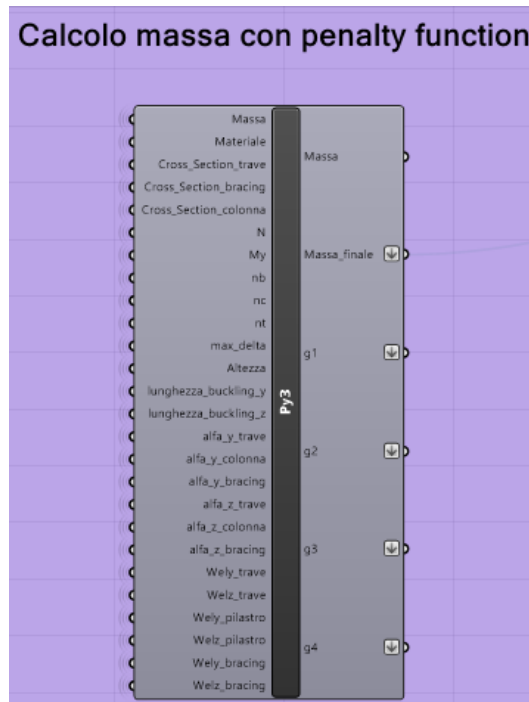


Figura 68 Codice - Script Python ottimizzazione

Gli output sono la “Massa”, “Massa finale” che tiene in considerazione delle penalty function e i valori delle quattro penalty functions.

Calcolata la massa corretta, l'ottimizzazione viene eseguita con il plug-in di *Grasshopper*, *Galapagos*. Esso è uno strumento di ottimizzazione evolutiva, che combina tutte le variabili al fine di ottenere la miglior soluzione possibile. Questa è definita attraverso la Fitness function, che nel caso proposto, risulta essere la funzione di Massa Corretta $M_{corretta}$. La Fitness function deve essere collegata alla porta chiamata Fitness (nel codice proposto il collegamento deve avvenire tra l'output dello script Python Massa_finale e la porta Fitness). L'altra porta Genome deve essere collegata con tutti gli sliders che controllano le variabili modificabili durante l'ottimizzazione. Quando viene impostata la disposizione, le variabili saranno gli sliders che modificano la tipologia di controvento e le tre sezioni. Se, invece, la tipologia è impostata, bisogna collegare il Genome al *Gene Pool*. L'interfaccia si presenta nel seguente modo:



Figura 69 Codice - Ottimizzazione

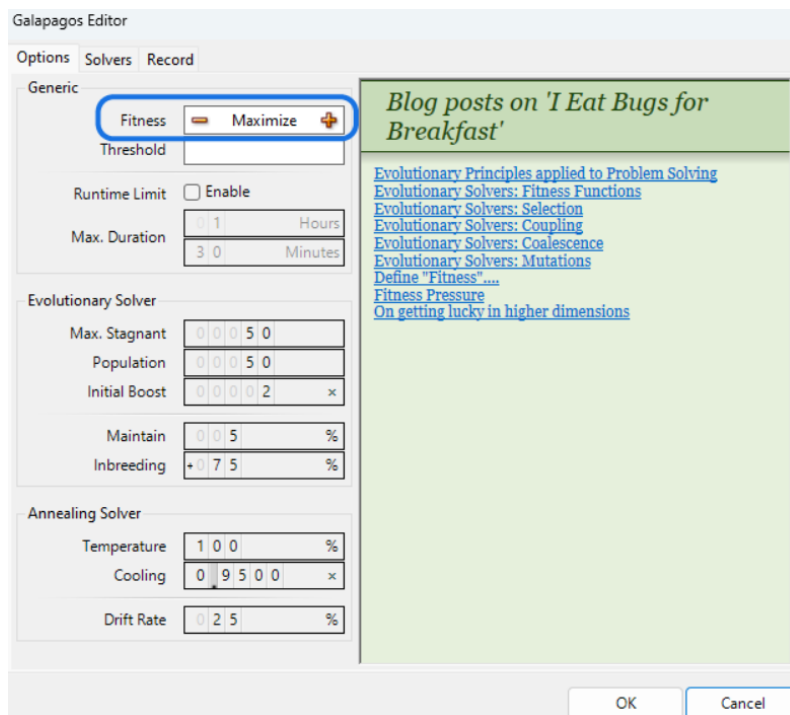


Figura 70 Codice - Impostazioni ottimizzazione

Il primo parametro "Fitness" definisce se l'obiettivo è minimizzare o massimizzare la funzione obiettivo. "Threshold" è un numero che indica la variazione minima oltre al quale l'algoritmo continua ad analizzare soluzioni. Ad esempio, se la massa dello step successivo è molto simile a quella dello step precedente, con una differenza tra le due minori del valore imposto nel threshold, allora il processo si stoppa. È possibile inoltre impostare il limite di massimo per la quale l'algoritmo lavora. Il settore "Evolutionary solver" indica alcuni parametri per l'ottimizzazione evolutiva. "Max Stagnant" indica il numero massimo di generazioni che possono passare senza alcun miglioramento nel valore di fitness prima che *Galapagos* interrompa il processo. "Population" indica il numero di

soluzioni che vengono create in ogni generazione, diverse dalla prima. Viene mantenuto su un valore fisso di 50, ma assumendo valori più alti può rallentare molto il processo. “Initial Boost” indica quanti valori vengono generati nella prima sezione. Un numero di soluzioni maggiore consente di aumentare la probabilità di trovare soluzioni ottimali. “Maintain” indica la percentuale di individui migliori che vengono mantenuti nella futura generazione. Ad esempio, se impostato come 5%, su una popolazione di 100 elementi, tiene i primi 5 elementi. “Inbreeding” definisce quanto incroci tra individui simili siano favoriti. Se impostato su un valore alto, ci sarà maggior probabilità che individui simili si riproducano portando a soluzioni più raffinate, ma con il rischio di maggiore stagnazione. Questo valore viene impostato compreso tra -100% e +100%, variabile da out-breeding totale a in-breeding totale, ovvero elementi molto vicini ed elementi molto lontani. La sezione Annealing solver definisce i parametri che consentono di applicare un algoritmo ispirato al raffreddamento dei metalli. Per questo motivo si parla di temperatura e raffreddamento. Infatti, durante il processo di raffreddamento dei metalli, gli atomi passano da muoversi liberamente (metallo caldo) fino a sistemarsi in posizioni stabili (freddo). La prima fase corrisponde alla possibilità di analizzare diverse soluzioni possibili, fino a stabilizzarsi sulle migliori. “Temperature” indica quanto Galapagos è disposto ad accettare soluzioni peggiori all’inizio. “Cooling” indica la velocità con la quale si riduce la possibilità di accettare valori peggiori. Nel primo parametro, valori alti significano che esplora molte soluzioni ma aumenta il tempo di analisi, mentre il secondo parametro alto indica l’idea di concentrarsi presto su soluzioni migliori. Infine, Drift Rate indica il tasso di deriva, per evitare che si blocchi troppo presto su una soluzione non ottimale.

La seconda interfaccia, chiamata “Solver”, si presenta come nella Figura 71 e contiene i grafici utili per visualizzare l’andamento delle soluzioni durante l’ottimizzazione.

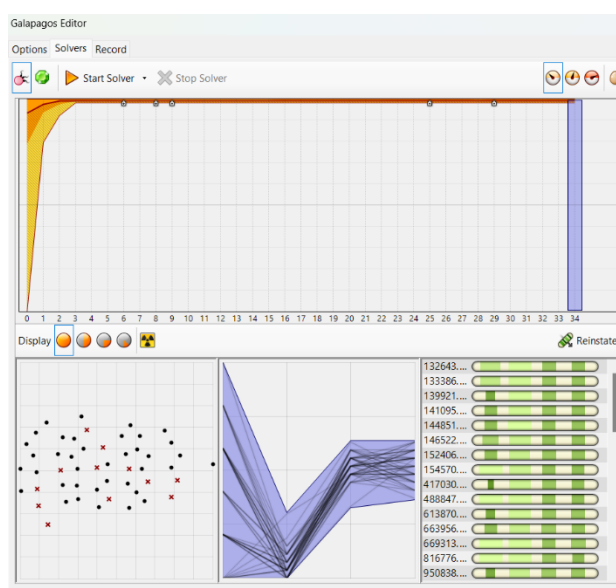


Figura 71 Codice - Solver ottimizzazione

Le prime due icone a sinistra permettono di scegliere l'algoritmo da utilizzare per la risoluzione. I processi sono:

- Risolutore evolutivo
- Annealing solver

I parametri che controllano i due procedimenti sono modificabili nella prima pagina di interfaccia.

Il primo grafico in alto a sinistra mostra se e come sta convergendo la funzione obiettivo. In particolare, sull'asse delle X è presente il numero di generazioni successive, mentre la Y mostra il valore della funzione obiettivo ottenuto. All'interno della prima iterazione "0", ci sarà un numero di individui uguale al prodotto tra i parametri "Population" e "Initial Boots", mentre nelle successive sarà ridotto al solo valore di "Population". La Figura 71 mostra delle sfumature di colore: quelle più chiare in giallo mostrano le soluzioni disperse e man mano che si avvicinano alla soluzione ottimale per quella generazione (linea scura) diventano sempre più scure.

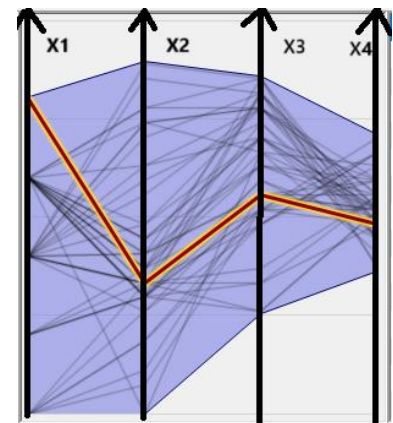


Figura 72 Codice - Grafico ottimizzazione

I valori in basso a destra rappresentano tutte le soluzioni analizzate durante le iterazioni. Vengono elencati gli individui relativi ad ogni generazione in ordine crescente (se l'obiettivo è minimizzare). Cliccando sul comando "Reinstallate" e selezionando uno di questi valori è possibile visualizzare la geometria in quello step. Connesso a questi risultati parziali, è anche il grafico in basso a metà. Esso è costituito da linee che rappresentano graficamente le iterazioni. Queste linee sono costituite da spezzate e il numero di tratti dipende dal numero di variabili nel processo di ottimizzazione. Ogni asse verticale passante per il punto della spezzata sarà uno slider come Figura 72.

Infine, l'ultimo grafico in basso a sinistra mette in mostra tutte le soluzioni analizzate su uno scatter plot. I punti neri rappresentano i valori accettati, mentre le croci rosse corrispondono a quelle rigettate. Il grafico ha n dimensioni e con n si indica le variabili del problema. Il grafico viene, però, riportato su un piano bidimensionale per facilità di visualizzazione. È un potente strumento usato per valutare la dispersione e il numero di soluzioni analizzate. Se i punti sono molto sparsi, significa che l'algoritmo sta esplorando in un ambiente ampio.

L'ultima pagina *Record* riporta le registrazioni di tutte le soluzioni analizzate. Può essere molto utile utilizzare registrare l'andamento delle variabili durante il processo con il componente *Data Recorder*, in modo da generare grafici utili. Questo passaggio è anche stato implementato per ottenere i grafici delle variabili.

4.4. Optimize Cross Section

Per eseguire il secondo step, è stato utilizzato il componente *Optimize Cross Section*, una procedura automatica che è stata implementata in *Karamba 3D* al fine di determinare la soluzione migliore che soddisfa le verifiche dell'Eurocodice 3 (EN 1993-1-1). Il funzionamento viene descritto al meglio nel capitolo 3.6.8 della guida di *Karamba 3D*. Questo comando sceglie la sezione ottimale tenendo in considerazione la sua resistenza e, volendo, anche il massimo spostamento possibile. In particolare, il componente prova tutte le sezioni relative alla famiglia impostata (es. se la trave ha una sezione IPE100, vengono analizzate solo le sezioni IPE) e, nel momento in cui trova una soluzione, questa viene presa e risulta quella ottimale. La procedura presuppone che le sezioni della famiglia siano ordinate dalla più desiderata a quella meno desiderata. Nel codice proposto, la soluzione più desiderata sarà quella con area minore e la meno desiderata con area maggiore, perché area minore significa massa minore. L'elenco di sezioni automatico impostato da *Karamba 3D* è secondo l'altezza e di conseguenza è necessario il riordino. Per eseguire questo passo fondamentale è necessario introdurre un componente *Disassemble Cross Section* seguito dal blocco *sort* che collegato all'area eseguisce un riordino in funzione del parametro. *Optimize Cross Section*, quindi, lavora su un singolo elemento e non sull'intera struttura. Minimizzare la massa di ogni singolo elemento significa minimizzare la massa totale della struttura. Ordinando le sezioni in base alla massa si possono ottenere sezioni con altezze molto diverse tra loro. Il componente dell'ottimizzazione esegue le verifiche relative agli ULS, che sono state descritte nel capitolo 3.2. Le verifiche tengono in conto dello sforzo normale, della flessione biassiale, della torsione e della forza di taglio. Innanzitutto, il primo passo eseguito è la classificazione delle sezioni trasversali, dalla classe 1 a 4 secondo la normativa. Alcune approssimazioni sono state introdotte nelle verifiche per semplificare le operazioni. Nel caso di instabilità flessionale, un ruolo importante è coperto dalla lunghezza libera di inflessione. La sua definizione è riportata nel 2.3.2., ma il software *Karamba 3D* la approssima come la distanza tra due nodi, definiti come il nodo estremo dell'elemento e il successivo nodo in cui convergono più di due elementi. Nel codice proposto risulterà essere la lunghezza della trave, dei pilastri e del controvento. Questo è veritiero nel caso in cui l'elemento sia semplicemente appoggiato ad entrambi gli estremi, altrimenti deve essere ridotto introducendo il fattore correttivo β . È possibile impostare il fattore correttivo all'interno del comando *Line to Element*, nell'input *Buckling Length Y* e *Z* con un *Panel*. Il valore $\beta = 1$ non è sempre cautelativo in caso di strutture complesse, perché potrebbe essere soggetto ad instabilità globale della struttura. Ai fini dell'analisi preliminare in 2D e del rispetto del dimensionamento compatibile secondo le verifiche previste dall'EN 1993-1-1, è sufficiente svolgere un'analisi di stabilità locale, con $\beta = 1$ per questioni di sicurezza. Un'altra precisazione importante è introdotta nel manuale riguardo la verifica all'instabilità flesso-torsionale. Molti sono i parametri difficili da calcolare perché sono standardizzati in funzione della distribuzione dei momenti. I valori di interazione k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} sono determinati dalle formule previste da EN

1993-1-1 appendice B. Questi valori, però, sono funzione di alcuni parametri che dipendono dalla distribuzione dei momenti come $C_{m,z}$. Essi sono stati impostati e limitati ad un minimo di 0.9. Il limite non viene applicato qualora si scegliesse di impostare l'input *SwayFrame* su "False". L'instabilità flesso-torsionale richiede anche il calcolo della lunghezza di instabilità che può essere ricavata come nel caso dell'instabilità flessionale o anche impostata manualmente.

Il componente richiede in input i seguenti parametri:

- "Model": richiede in input la struttura da ottimizzare.
- "ElemId": definisce quali elementi sono da ottimizzare e se non specificato, si ottimizza l'intera struttura.
- "GroupIDs": indica quali gruppi di elementi devono avere sezione uguale e quali differente.
- "CroSecs": è la lista delle sezioni utilizzabili per l'ottimizzazione. È connesso con tutti gli output del componente *Cross Section Range Selector* delle famiglie di elementi.
- "MaxUtil": è connesso con il *Panel* che imposta il valore di massimo utilizzo della struttura. Se non specificato è pari a 1, ma per motivi di sicurezza può essere anche ridotto.
- "LCasesUtil": specifica la combinazione dei carichi necessari per le verifiche all'ULS. Di conseguenza è collegata con il *Panel* che indica la combinazione ULS.
- "MaxDisp": è il massimo spostamento disponibile da normativa. Qualora venisse impostato anche la verifica di spostamento massimo deve essere rispettata.
- "LCasesDisp": è la combinazione dei carichi usata per la verifica a spostamento massimo. La combinazione richiesta da normativa è quella SLS.

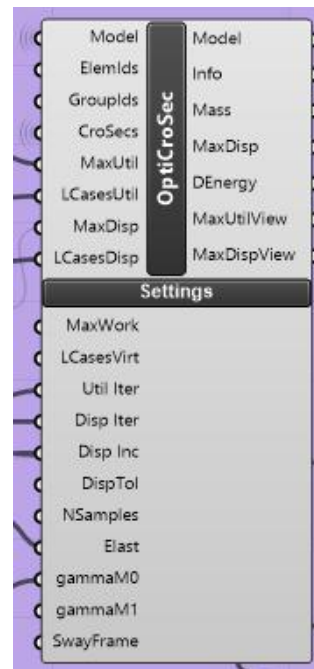


Figura 73 Codice - Optimize Cross section

Nella sezione "Setting", alcune specifiche impostazioni possono essere riportate. Alcune delle più utili da usare nel codice proposto sono:

- "Util Iter": definisce il numero massimo di iterazioni per soddisfare la verifica a capacità portante. È impostato automaticamente pari a 5, ma può essere cambiato in base alla precisione voluta.
- "Disp Iter": allo stesso modo definisce il numero massimo di iterazioni per la verifica dello spostamento. Come prima è impostato automaticamente pari a 5, ma nuovamente può essere modificato.

- “Disp Inc”: stabilisce il fattore di tolleranza per il raggiungimento degli obiettivi di spostamenti.
- “NSamples”: indica il numero di punti per le valutazioni di utilizzo. È automaticamente impostato a 3.
- “Elast”: è un input che consente di gestire come viene eseguita l’analisi, se in progettazione elastica e plastica. Se impostato su “True”, la progettazione viene eseguita in modo elastico, ma se impostata con un *Boolean Toggle* su “False”, viene eseguita in modo plastico nel caso di sezioni di Classe 1 e 2.
- “GammaM0” e “gammaM1”: Fattori di sicurezza definiti da normativa secondo EN 1993-1-1. Le NTC 2018 prevedono di usare 1.05 per entrambi i coefficienti.

In output, fornisce gli stessi risultati del componente Analyze, con l’eccezione di “MaxUtilView” e “MaxDispView”, che forniscono informazioni sul massimo utilizzo della sezione. Qualora qualche elemento non fosse verificato viene riportato il suo numero identificativo all’interno di esse.

Concludendo, il processo può essere ricondotto ai seguenti passaggi:

1. Calcolo delle forze nei punti “nSamples” lungo le travi utilizzando le sezioni trasversali iniziali.
2. Per ogni elemento l’algoritmo seleziona la prima sezione sufficiente alle verifiche rispettando il valore di utilizzo specificato da “MaxUtil”.
3. Se è stato raggiunto il numero massimo di iterazioni “Util Iter” o se non sono più necessarie modifiche, il procedimento si interrompe, altrimenti esegue le stesse operazioni dal primo passaggio con le nuove sezioni.

CAPITOLO 5 – CASI STUDIO

Il codice è completo e pronto da usare. Di seguito vengono proposti differenti casi studio che mettono in risalto le potenzialità e le problematiche del metodo utilizzato. Sono state testate due strutture con dimensioni differenti e con disposizione di carico varie per valutare eventuali effetti. Le loro caratteristiche sono riportate di seguito. I casi studi proposti sono:

- Caso studio 1: disposizione dei controventi fissati, determinazione della miglior tipologia di controvento e delle sezioni univoche applicato alla struttura 1 sotto l'azione di carico laterale, (*Caso studio 1.1*), centrale (*Caso studio 1.2*) e opposto (*Caso studio 1.3*);
- Caso studio 2: disposizione dei controventi fissati, determinazione della miglior tipologia di controvento e delle sezioni univoche applicato alla struttura 2 sotto l'azione di carico laterale (*Caso studio 2.1*), centrale (*Caso studio 2.2*) e opposto (*Caso studio 2.3*);
- Caso studio 3: determinazione della miglior disposizione dei controventi a X nella struttura 2 senza impostare la simmetria e delle sezioni univoche sotto l'azione del carico laterale. L'analisi è stata eseguita lavorando sia sui moduli (*Caso studio 3.1*), scegliendo quelli da “riempire” con il controvento, sia sulle singole aste (*Caso studio 3.2*), eliminando quelle non necessarie;
- Caso studio 4: determinazione della miglior disposizione dei controventi a X nella struttura 2 vincolando la simmetria e delle sezioni univoche sotto l'azione del carico laterale (*Caso studio 4.1.1* e *4.2.1*) e centrale (*Caso studio 4.1.2* e *4.2.2*). L'analisi è stata eseguita lavorando sia sui moduli (*Caso studio 4.1*), scegliendo quelli da “riempire” con il controvento, sia sulle singole aste (*Caso studio 4.2*), eliminando quelle non necessarie;

Non sempre sono state testate tutte le configurazioni di carico o le strutture, perché l'interesse era di verificare la validità e l'applicabilità del metodo a questo tipo di strutture.

Per ognuno dei casi studio, sono stati eseguiti tre step:

Step 1 → *Galapagos*, quindi l'algoritmo genetico che serve a trovare dove mettere i controventi o quale tipologia scegliere (X, V, K, ecc.). Consente, inoltre, di determinare la sezione unica per pilastri, una per le travi e una per i controventi.

Step 2 → *Optimize Cross Section*, ma in modo controllato, con una sezione unica per pilastri, una per travi e una per controventi. Questo passaggio è stato utilizzato per verificare le dimensioni delle sezioni usate nello step precedente.

Step 3 → *Optimize Cross Section* libero, con sezioni diverse per ogni elemento (utile per capire i limiti, ma spesso ha dato risultati strani o non convergenti).

Il modulo *Optimize Cross Section* è fortemente influenzato dalle impostazioni inserite. La figura mostra come sono state fissate per le analisi successive. Al fine di rispettare l'analisi evolutiva eseguita a priori è stato impostato un massimo utilizzo pari ad 1 e lo spostamento massimo pari ad 1/500 dell'altezza totale dell'edificio per lo stato limite di esercizio (B). I numeri delle iterazioni impostate sono ritenuti sufficienti per l'obiettivo della ricerca finale. Per mantenersi a favore di sicurezza, si lavora in campo elastico, ricordandosi che l'acciaio, per le classi 1 e 2, può lavorare anche in campo plastico. Infine, il valore di gamma0 e gamma1 sono impostati pari a 1.05 per uniformità con le NTC



Figura 74 Codice – Impostazioni Optimize Cross Section

2018. Nell'input CroSecs, converge la lista di tutte le sezioni previste da *Karamba3D* ordinate in base all'area, ovvero in base al peso. Di conseguenza, *Optimize Cross Section* dovrebbe trovare la prima sezione sufficiente con il peso minore. Durante la fase evolutiva, per ridurre il numero di iterazioni disponibili, sono stati ipostati dei limiti alle sezioni disponibili trascurando quelle che mai potrebbero essere utilizzate. Un discorso a parte riguarda le sezioni CHS, per le quali, con uno script Python si rendono disponibili quelle aventi spessore medio a parità di diametro.

	Famiglia	Sezioni	Indici in Karamba
Travie pilastri	IPE	80-600	0:17
	HEA	100-1000	42:65
	HEB	100-800	66:87
Controventi	IPE	180-600	0:17
	HEA	100-1000	42:65
	HEB	100-800	66:87
	CHS	21.3x2.6 - 813.6x16.0	220:420 (0:25)

Tabella 21 Impostazione sezioni

5.1. Strutture

Entrambe le strutture analizzate hanno un'altezza complessiva di 70 m e una larghezza di 28 m. Il rapporto tra "base" e altezza e l'altezza complessiva rendono la struttura analizzabile come edificio alto. Gli edifici si suppongono situati in centro a Milano, in un'area urbana con costruzioni di grande altezza.

5.1.1. Geometria

La geometria è stata definita seguendo quanto spiegato nel CAPITOLO 3 – DESIGN PARAMETRICO gestendo gli slider necessari.

Proprietà Struttura 1			Proprietà Struttura 2		
larghezza modulo	3.50	m	larghezza modulo	7.00	m
altezza di piano	3.50	m	altezza di piano	5.00	m
numero di moduli	8		numero di moduli	4	
numero di piani	20		numero di piani	14	
larghezza totale edificio	28.00	m	larghezza totale edificio	28.00	m
altezza totale edificio	70.00	m	altezza totale edificio	70.00	m

Tabella 22 Applicazione - Proprietà struttura

5.1.2. Carichi

Per una prima analisi indicativa, la struttura è soggetta al peso proprio, al carico vento e al carico variabile. Il primo è calcolato direttamente da *Grasshopper*, dipende dalla sezione degli elementi strutturali e varia costantemente durante l'ottimizzazione. Il carico variabile è stato posto pari a 3 kN/m² moltiplicato per metà della distanza tra i pilastri in modo da renderlo lineare ed applicabile alla trave. Il vento è stato calcolato usando la soluzione dinamica proposta da CNR-DT 207/2018. I dati di input iniziali richiesti dalla normativa per la verifica sono qui riportati. Si è considerato che l'edificio si trova in un'area urbana con altre strutture alte vicino. Inoltre, essendo situato a Milano, in Lombardia, secondo la Tab. 3.3.1, la velocità del sito V_b è uguale a 25 m/s.

Proprietà sito		
Località	Milano	
Classificazione rugosità	A	
Classificazione esposizione	IV	
Velocità sito	25	[m/s]

Tabella 23 Applicazione - Calcolo carico vento (Proprietà sito)

Ripercorrendo il procedimento descritto al paragrafo 3.3, il primo step è calcolare la componente statica ed in particolare il carico su faccia sopravvento e su quella sottovento in modo da applicare poi la formula (75).

a_0	1000	m
K_r	0.22	
z_0	0.3	m
z_{min}	8	m
ρ_0	1.25	kg/m ³
$V_{b,0}$	25	[m/s]
c_a	1	
V_b	25	[m/s]
q_r	390.63	[N/m ²]
c_d	1	

Faccia sopravvento		Faccia sottovento	
$h/d > 1$		$1 < h/d < 5$	
c_{pe}	0.8	c_{pe}	-0.59

Tabella 24 Applicazione - Parametri calcolo del vento

Da questi calcoli, sono stati ottenuti tutti i valori presenti nella Tabella 24 sotto le colonne faccia sopravento e sottovento e la forza statica F_s . Il procedimento esatto richiede di moltiplicare questo termine per il coefficiente dinamico c_{dD} in modo da ottenere la componente dinamica F_d . Il calcolo e i risultati intermedi sono riportati nella Tabella 25.

Calcolo coefficiente dinamico	
z_e	42
$v_m(z_e)$	27.179
$I_v(z_e)$	0.202
$L_v(z_e)$	300
n_d	0.714
ξ_D	0.008
B^2	0.692
S_D	0.035
η_H	7.359
η_B	2.943
R_h	0.127
R_b	0.282
R_d^2	0.122
v_d	0.277
g_d	3.378
G_d	2.234
c_{dD}	0.924

Tabella 25 Applicazione - Calcolo coefficiente dinamico

I risultati conclusivi e i valori applicati sulla struttura in *Grasshopper* F_s sono riportati nella Tabella 26. Il carico finale applicato sull'edificio è la metà del carico calcolato F_s ($F_s/2$) perché ritenuto metà agente sulla faccia in analisi e metà sull'altra opposta.

Struttura 1									
z[m]	Faccia sopravento			Faccia sottovento			F _d	F _s	F _s /2
	z _e [m]	c _e	q'[N/m ²]	z _e [m]	c _e	q''[N/m ²]	[kN]	[kN]	[kN]
3.5	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
7	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
10.5	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
14	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
17.5	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
21	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
24.5	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	147.22	136.09	68.04
28	28	2.53	989.37	70.00	3.29	1283.67	149.90	138.56	69.28
31.5	31.5	2.63	1025.42	70.00	3.29	1283.67	152.73	141.18	70.59
35	35	2.71	1058.11	70.00	3.29	1283.67	155.29	143.55	71.77
38.5	38.5	2.79	1088.05	70.00	3.29	1283.67	157.64	145.72	72.86
42	42	2.86	1115.68	70.00	3.29	1283.67	159.80	147.72	73.86
45.5	45.5	2.92	1141.35	70.00	3.29	1283.67	161.82	149.58	74.79
49	49	2.98	1165.34	70.00	3.29	1283.67	163.70	151.32	75.66
52.5	52.5	3.04	1187.85	70.00	3.29	1283.67	165.46	152.95	76.47
56	56	3.10	1209.08	70.00	3.29	1283.67	167.13	154.49	77.24
59.5	59.5	3.15	1229.16	70.00	3.29	1283.67	168.70	155.94	77.97
63	63	3.20	1248.22	70.00	3.29	1283.67	170.19	157.32	78.66
66.5	66.5	3.24	1266.36	70.00	3.29	1283.67	171.62	158.64	79.32
70	70	3.29	1283.67	70.00	3.29	1283.67	172.97	159.89	79.95

Struttura 2									
z[m]	Faccia sopravento			Faccia sottovento			F _d	F _s	F _s /2
	z _e [m]	c _e	q'[N/m ²]	z _e [m]	c _e	q''[N/m ²]	[kN]	[kN]	[kN]
5	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
10	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
15	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
20	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
25	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
30	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
35	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
40	25	2.45	955.17	70.00	3.29	1283.67	210.31	194.41	97.20
45	45	2.91	1137.80	70.00	3.29	1283.67	230.77	213.32	106.66
50	50	3.00	1171.91	70.00	3.29	1283.67	234.59	216.85	108.42
55	55	3.08	1203.13	70.00	3.29	1283.67	238.09	220.08	110.04
60	60	3.15	1231.94	70.00	3.29	1283.67	241.31	223.06	111.53
65	65	3.22	1258.69	70.00	3.29	1283.67	244.31	225.83	112.92
70	70	3.29	1283.67	70.00	3.29	1283.67	247.11	228.42	114.21

Tabella 26 Applicazione - Carico vento

Come detto in precedenza, il carico viene applicato secondo le seguenti tre configurazioni:

STRUTTURA 1

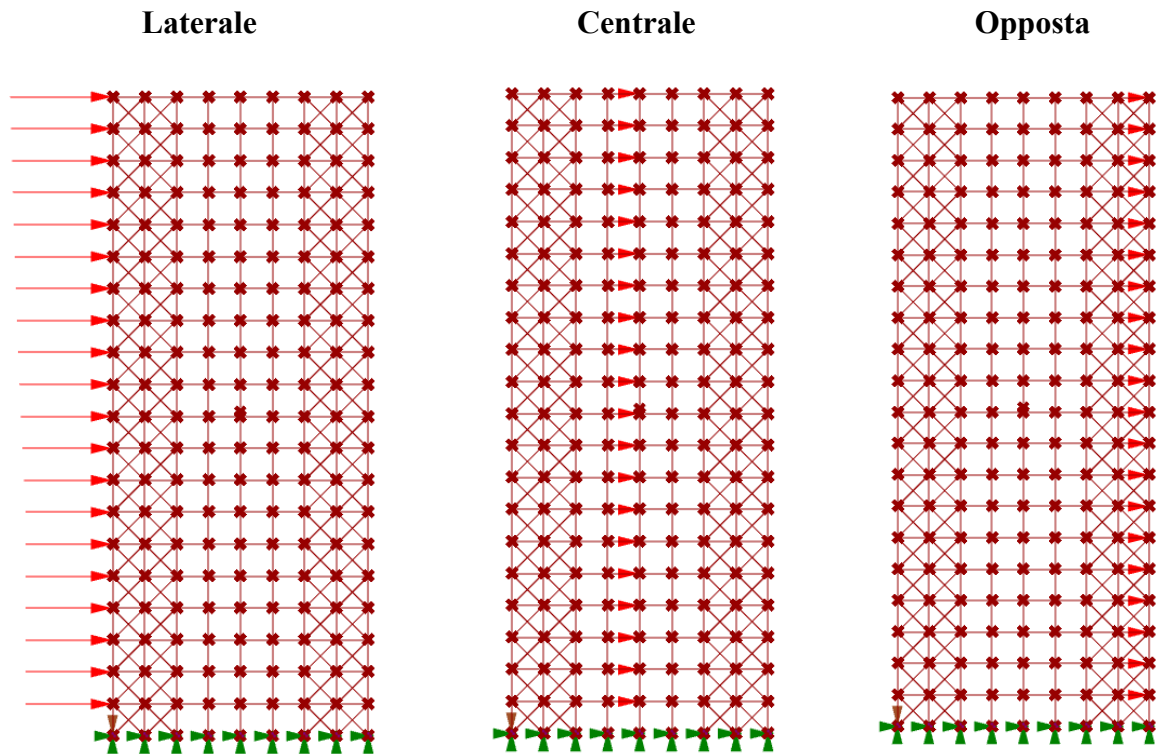


Figura 75 Applicazione - Disposizione carichi struttura 1

STRUTTURA 2

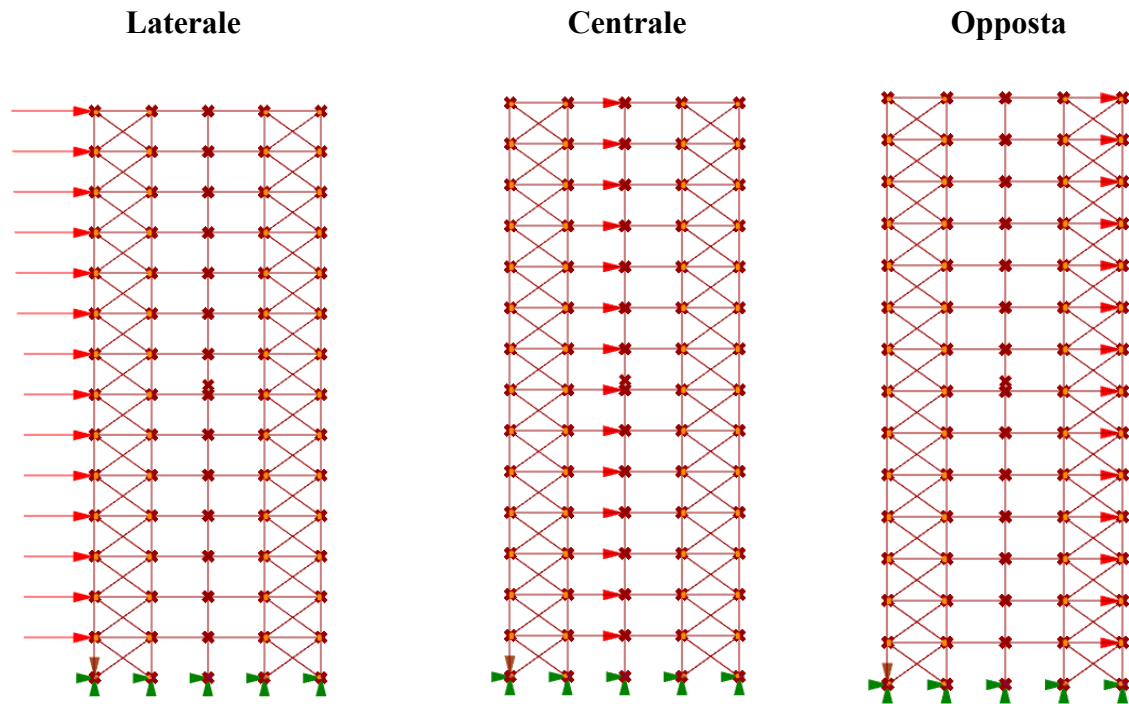


Figura 76 Applicazione - Disposizione carichi struttura 2

5.2. Casi studio – risultati

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei diversi casi studio. Essi sono riproposti come elencati nell'introduzione del CAPITOLO 5 – CASI STUDIO. Per valutare la bontà dei risultati ottenuti vengono inseriti sia il parametro utilization che il rapporto stress/strength. Il primo valuta il livello di utilizzazione, un valore complesso che tiene conto della normativa di riferimento. In materiali come l'acciaio, *Optimize Cross Section* prevede un utilization maggiore di 1, che tiene in conto della possibilità della plasticizzazione dell'elemento. Il secondo valore, invece, è un rapporto puntuale che confronta la tensione agente locale rispetto alla resistenza. Questo parametro, invece, deve essere sempre minore di uno per garantire la sicurezza dell'elemento.

5.2.1. Caso studio 1

Il primo caso studio prevede l'analisi della Struttura 1 in cui è stata fissata la posizione dei controventi. L'edificio è soggetto alle tre condizioni di carico proposte, laterale, centrale e opposta, oltre al carico variabile e al peso proprio della struttura. In questo modo, in fase di ottimizzazione verranno cercati la miglior tipologia di controventi e la sezione ottimale per controventi, travi e pilastri al fine di minimizzare la massa totale dell'edificio.

Come descritto nel CAPITOLO 3 – DESIGN PARAMETRICO, la posizione dei controventi è stata inserita utilizzando il *panel* apposito e introducendo il vettore (100). Il risultato è immediatamente visibile nella Figura 77.

$$\left\{ \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right]_1 \\ \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right]_2 \\ \vdots \\ \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right]_{20} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} True \\ True \\ False \\ False \\ False \\ False \\ True \\ True \end{array} \right]_1 \\ \left[\begin{array}{c} True \\ True \\ False \\ False \\ False \\ False \\ True \\ True \end{array} \right]_2 \\ \vdots \\ \left[\begin{array}{c} True \\ True \\ False \\ False \\ False \\ False \\ True \\ True \end{array} \right]_{20} \end{array} \right\} \quad (100)$$

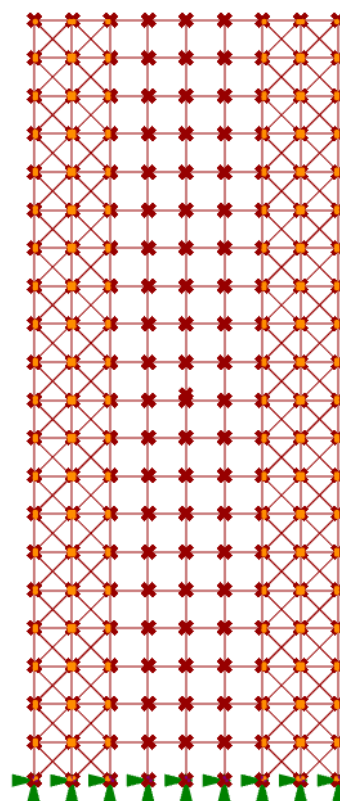


Figura 77 Caso studio 1 - Disposizione controventi

Per ogni condizione di carico sono stati eseguiti i tre step (*Galapagos*, *Optimize Cross Section* controllato, *Optimize Cross Section* libero) e riportati i loro risultati.

5.2.1.1. *Caso studio 1.1 – Carico laterale*

Step 1

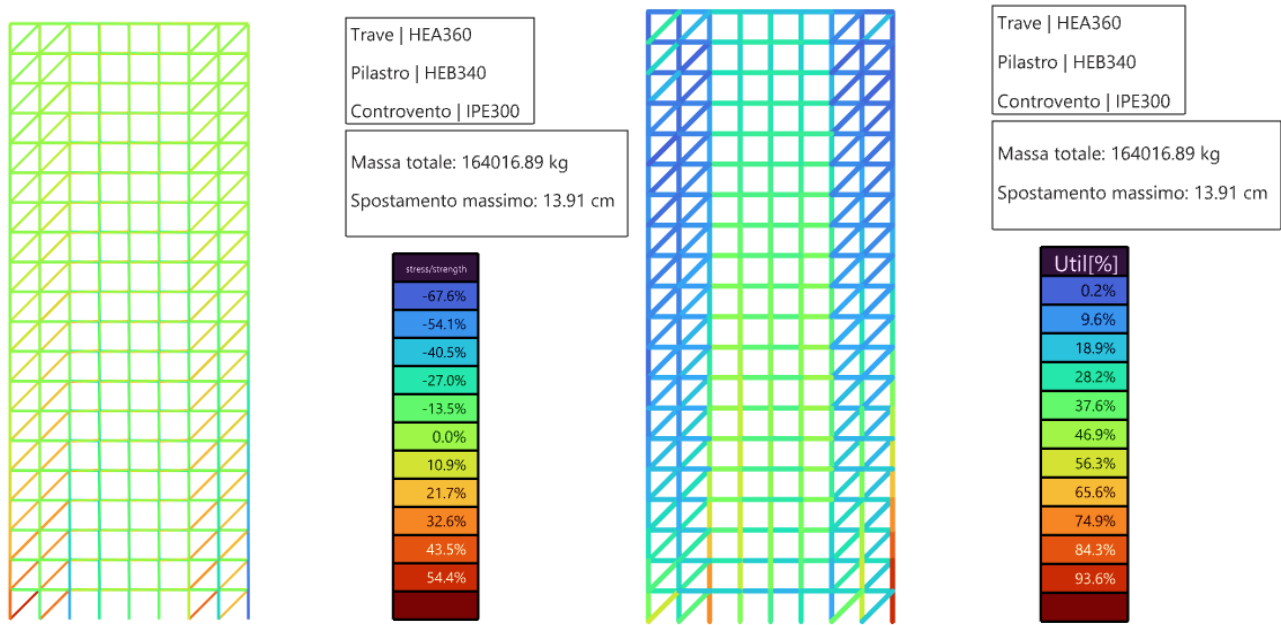


Figura 78 Caso studio 1.1 - Step 1- risultati

Step 2

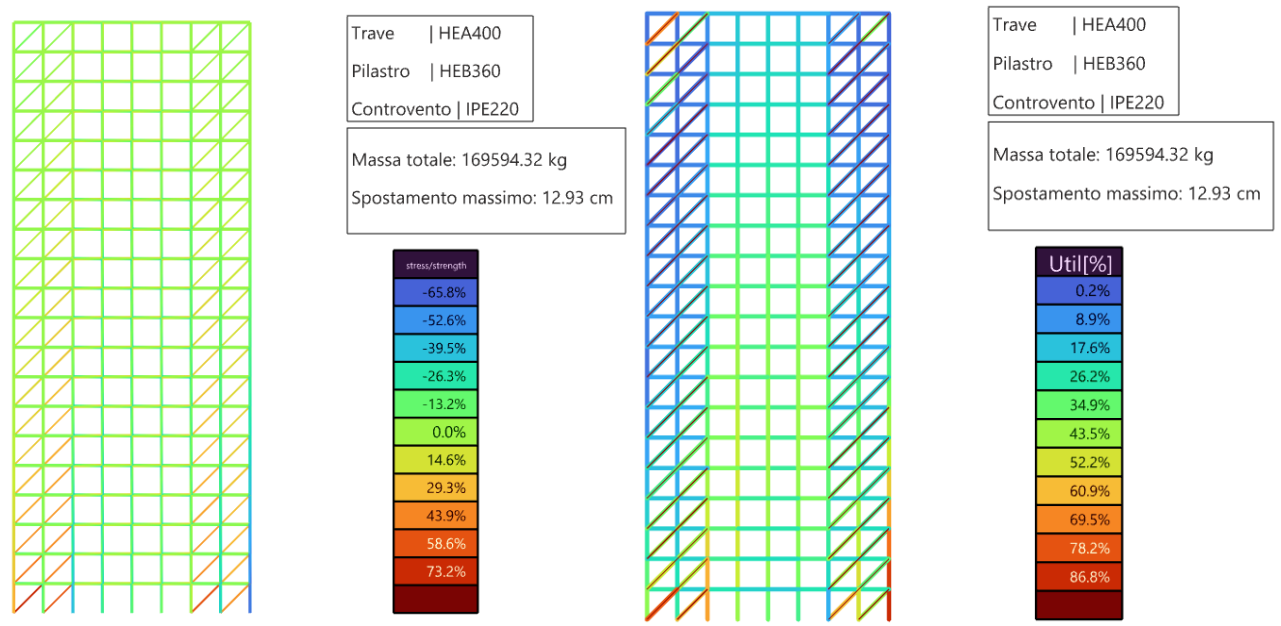


Figura 79 Caso studio 1.1 - Step 2 - Risultati

Step 3

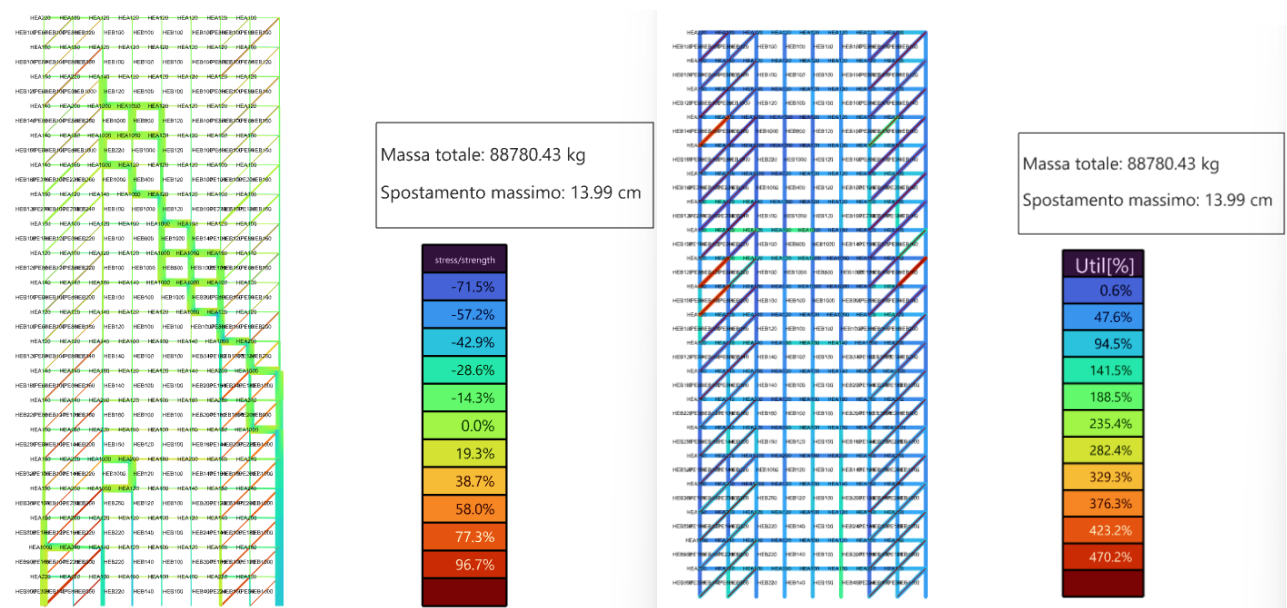


Figura 80 Caso studio 1.1 - Step 3 – Risultati

5.2.1.2. Caso studio 1.2 – Carico centrale

Step 1

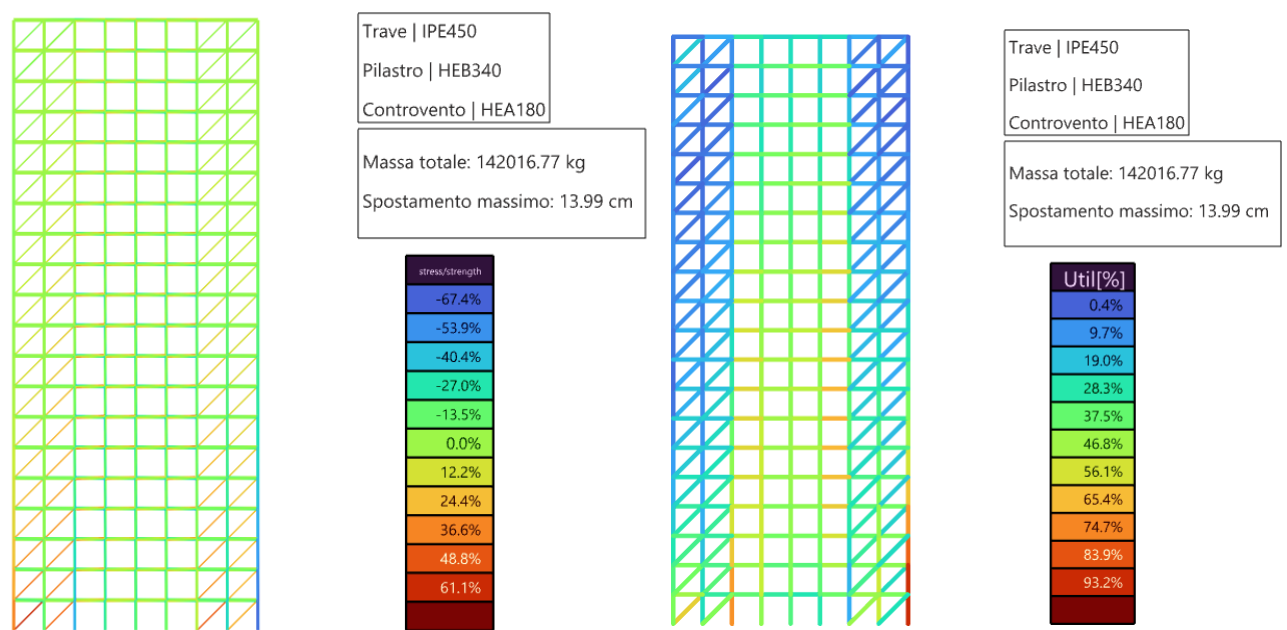


Figura 81 Caso studio 1.2 - Step 1 - Risultati

Step 2

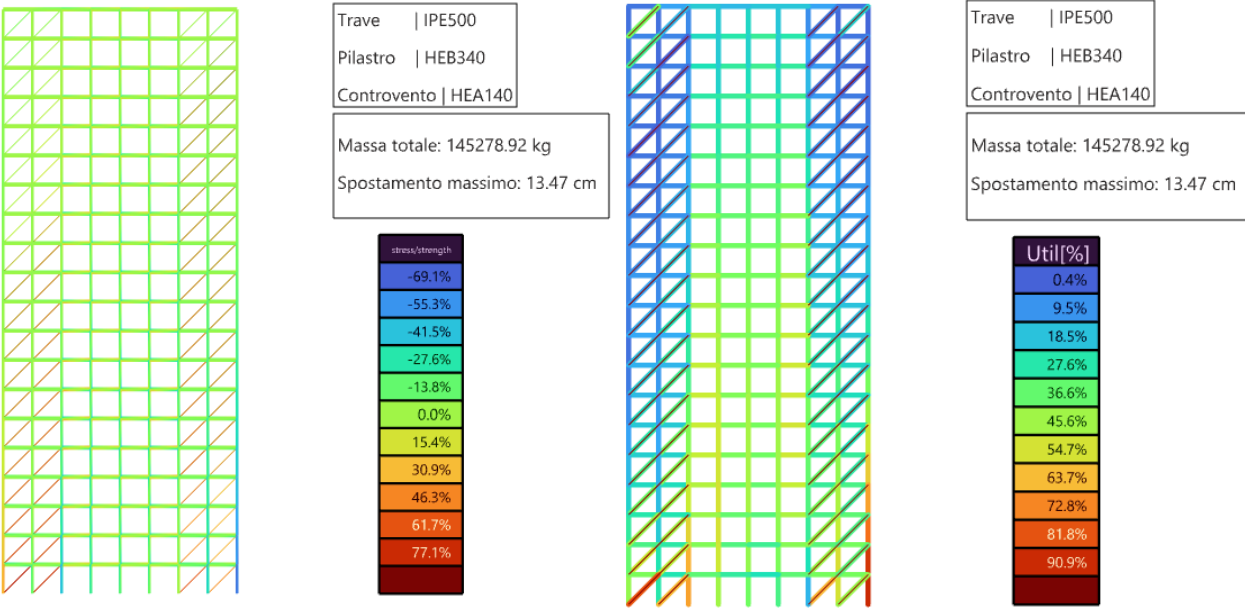


Figura 82 Caso studio 1.2 - Step 2 – Risultati

Step 3

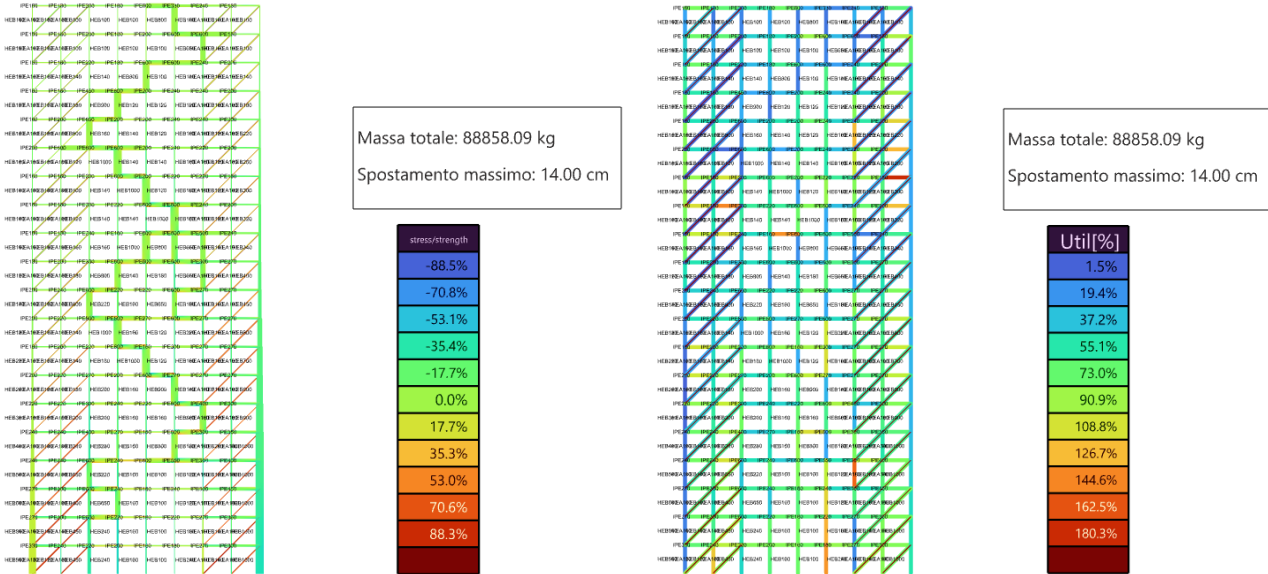


Figura 83 Caso studio 1.2 - Step 3 – Risultati

5.2.1.3. Caso studio 1.3 – Carico opposto

Step 1

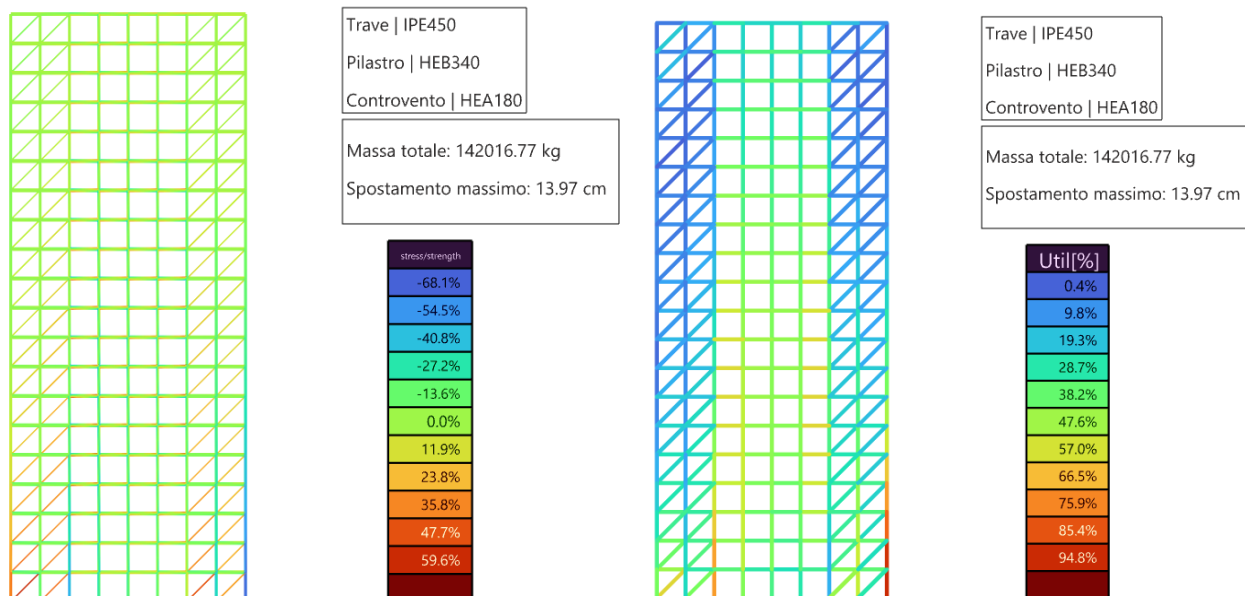


Figura 84 Caso studio 1.3 - Step 1 – Risultati

Step 2

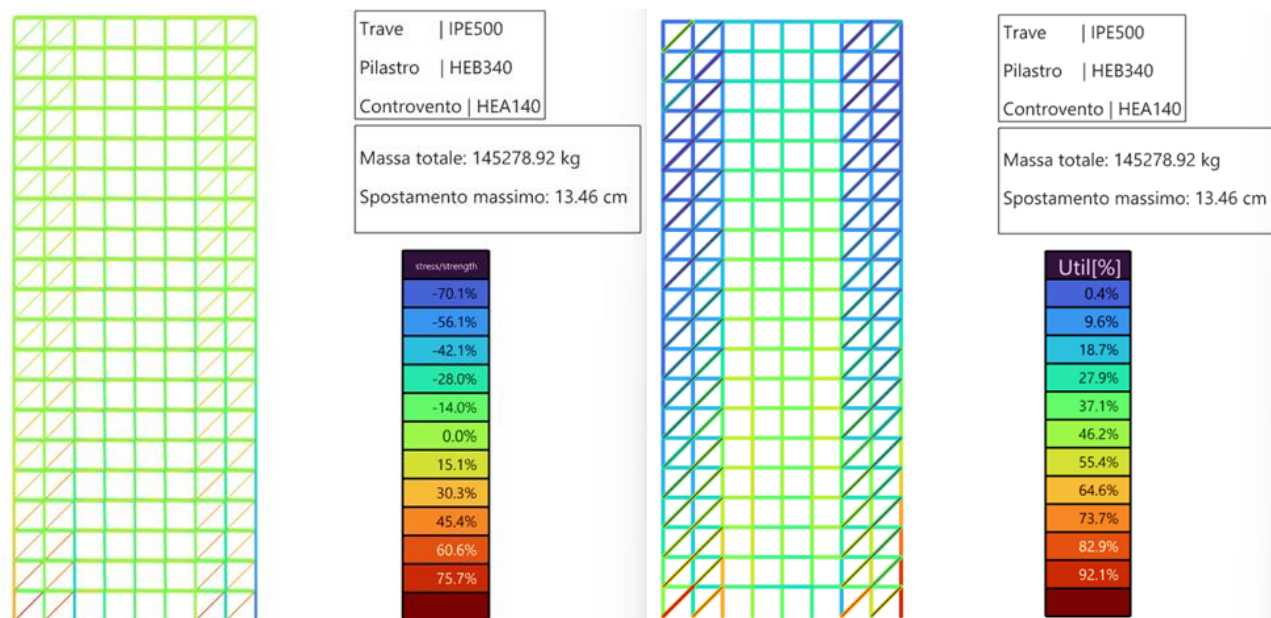


Figura 85 Caso studio 1.3 - Step 2 - Risultati

Step 3

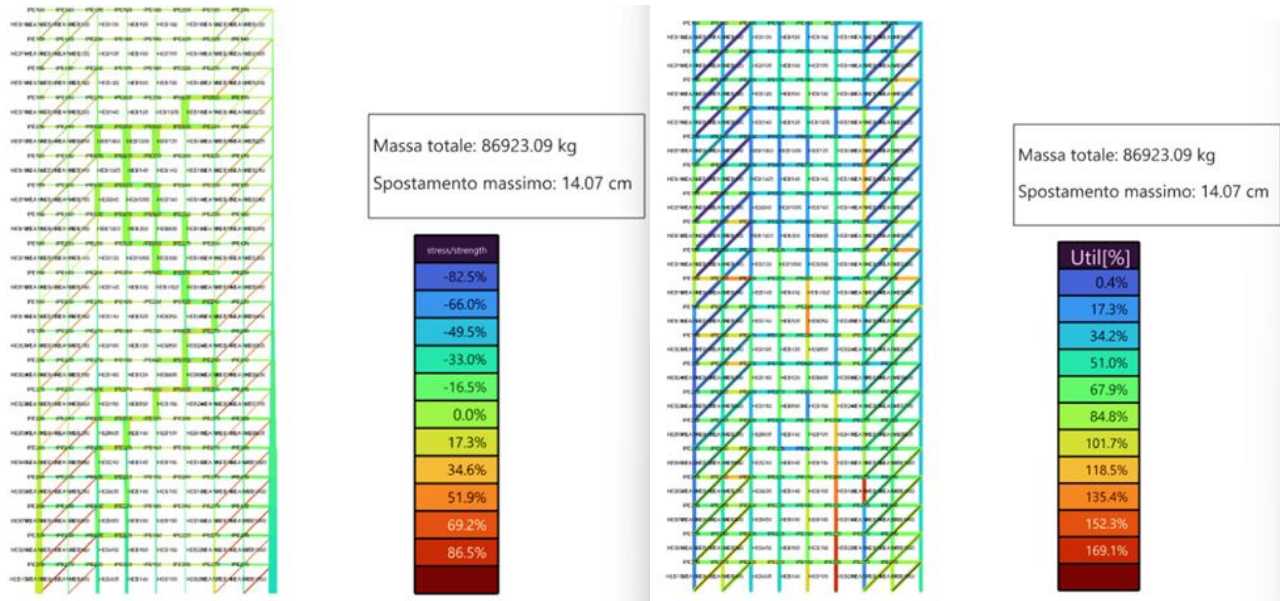


Figura 86 Caso studio 1.3 - Step 3 - Risultati

5.2.2. Caso studio 2

Il secondo caso studio ripercorre esattamente gli stessi passi del primo, ma applicati alla struttura 2. Questa analisi è stata introdotta per vedere se e come le dimensioni dei moduli influenzano i risultati. Per rendere le strutture simili e comparabili, i controventi sono stati disposti nella stessa posizione della struttura 1. La disposizione ottenuta secondo il vettore (101) e riproposta nella Figura 87.

$$\begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_1 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_2 \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{14} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} True \\ False \\ False \\ True \end{bmatrix}_1 \\ \begin{bmatrix} True \\ False \\ False \\ True \end{bmatrix}_2 \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} True \\ False \\ False \\ True \end{bmatrix}_{14} \end{Bmatrix} \quad (101)$$

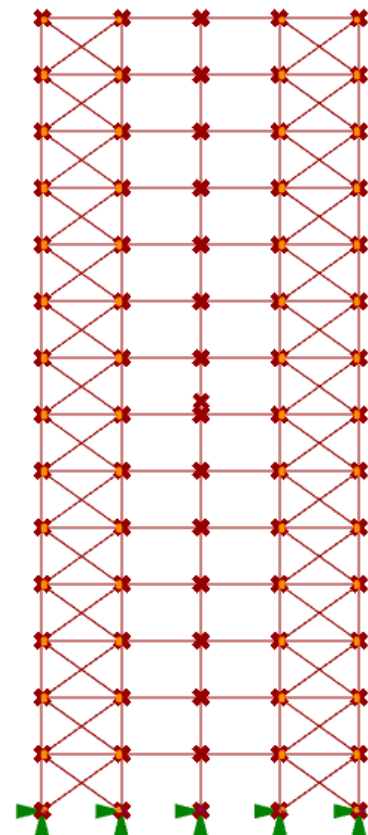


Figura 87 Caso studio 2 - Disposizione controventi

5.2.2.1. Caso studio 2.1 – Carico laterale

Step 1

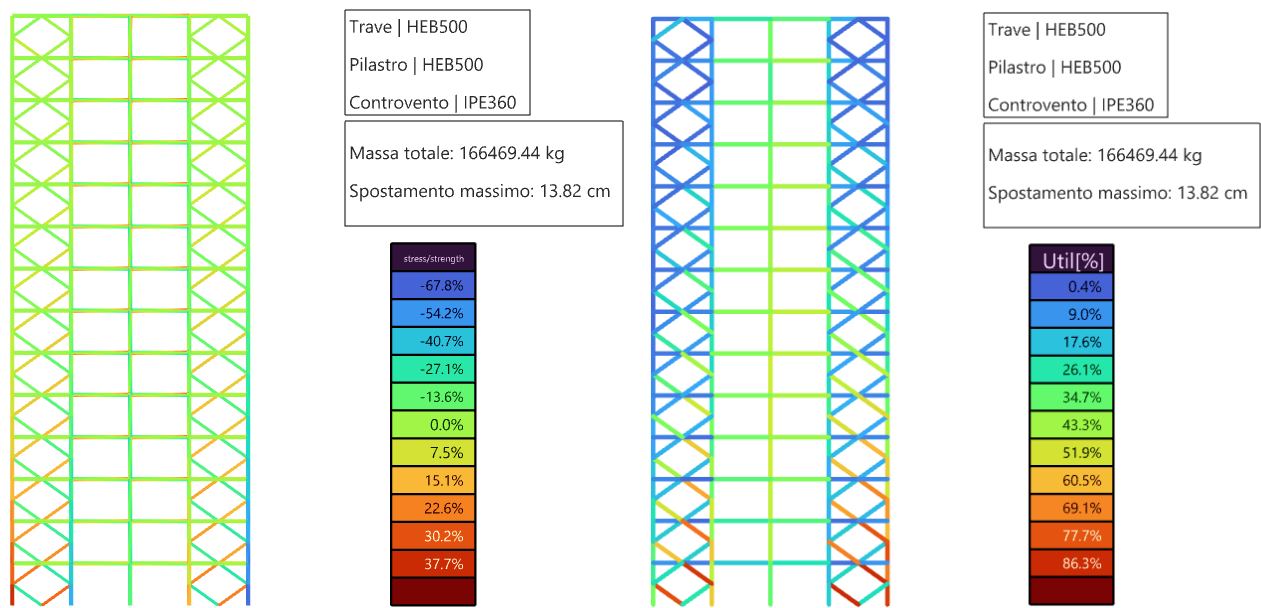


Figura 88 Caso studio 2.1 - Step 1 – Risultati

Step 2

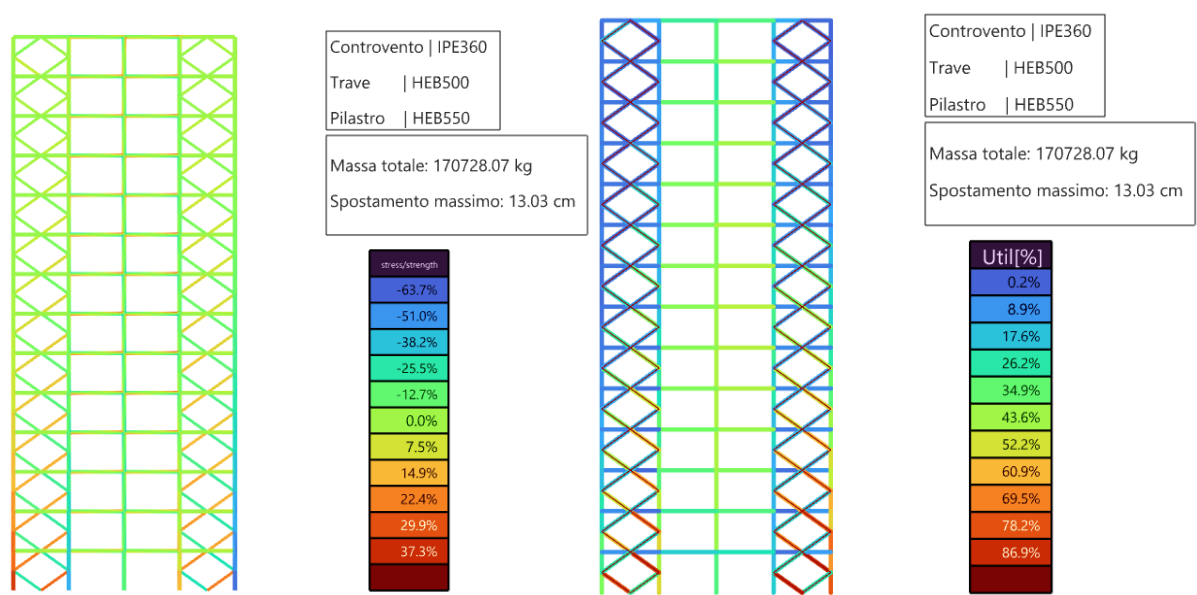


Figura 89 Caso studio 2.1 - Step 2 – Risultati

Step 3

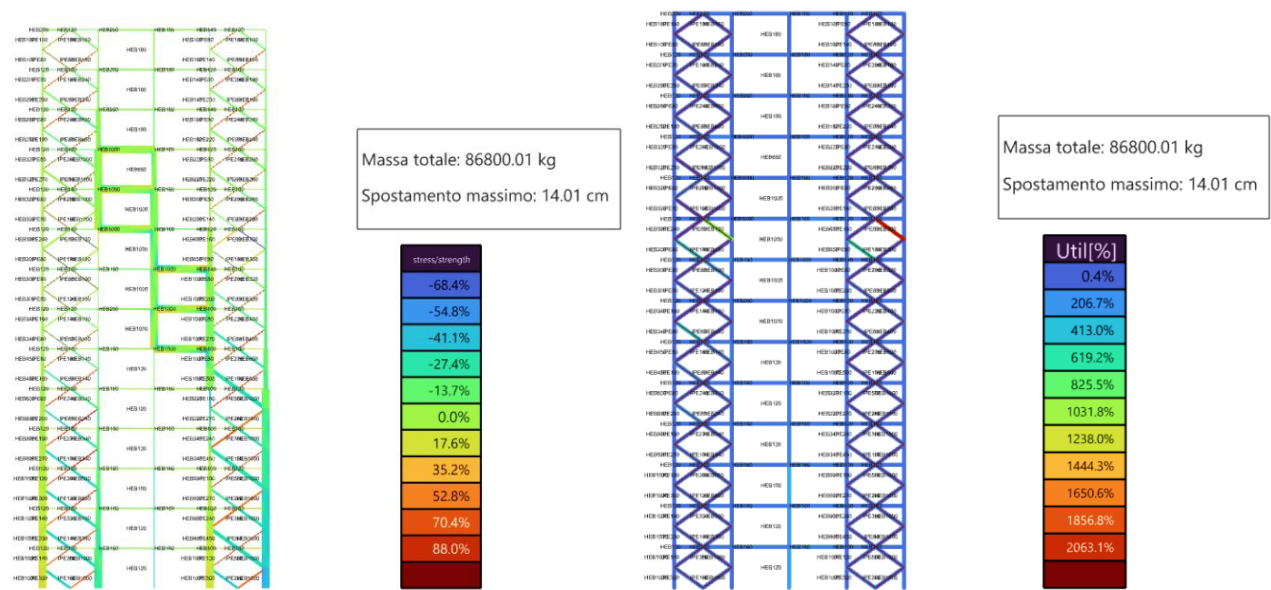


Figura 90 Caso studio 2.1 - Step 3 – Risultati

5.2.2.2. Caso studio 2.2 – Carico centrale

Step 1

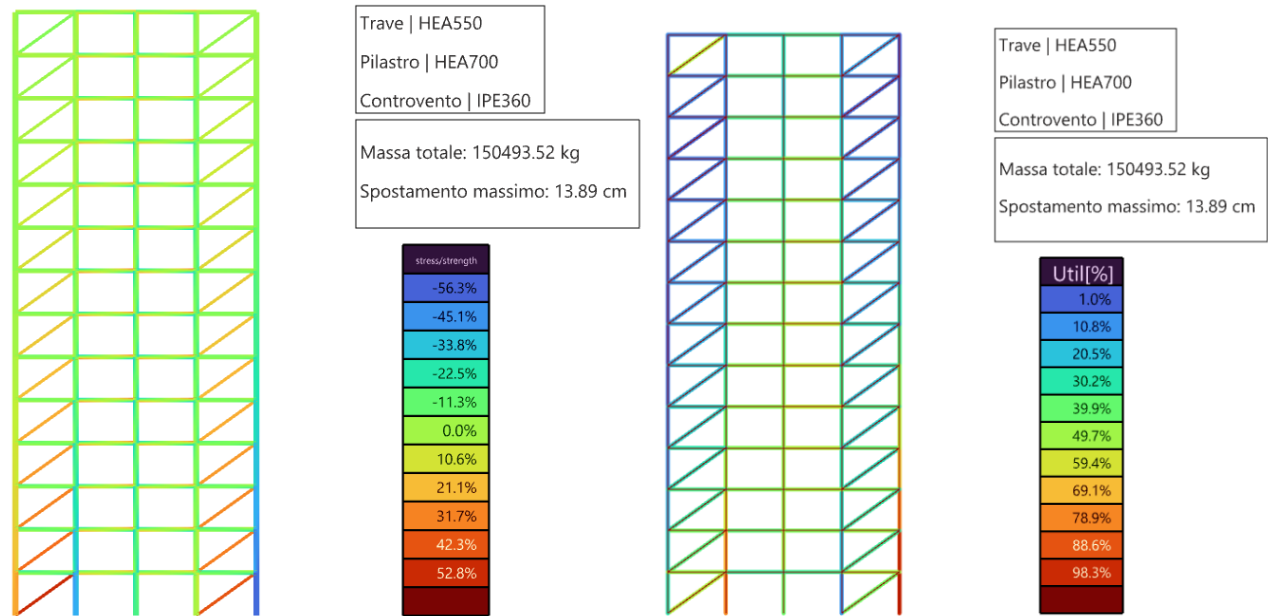


Figura 91 Caso studio 2.2- Step 1 – Risultati

Step 2

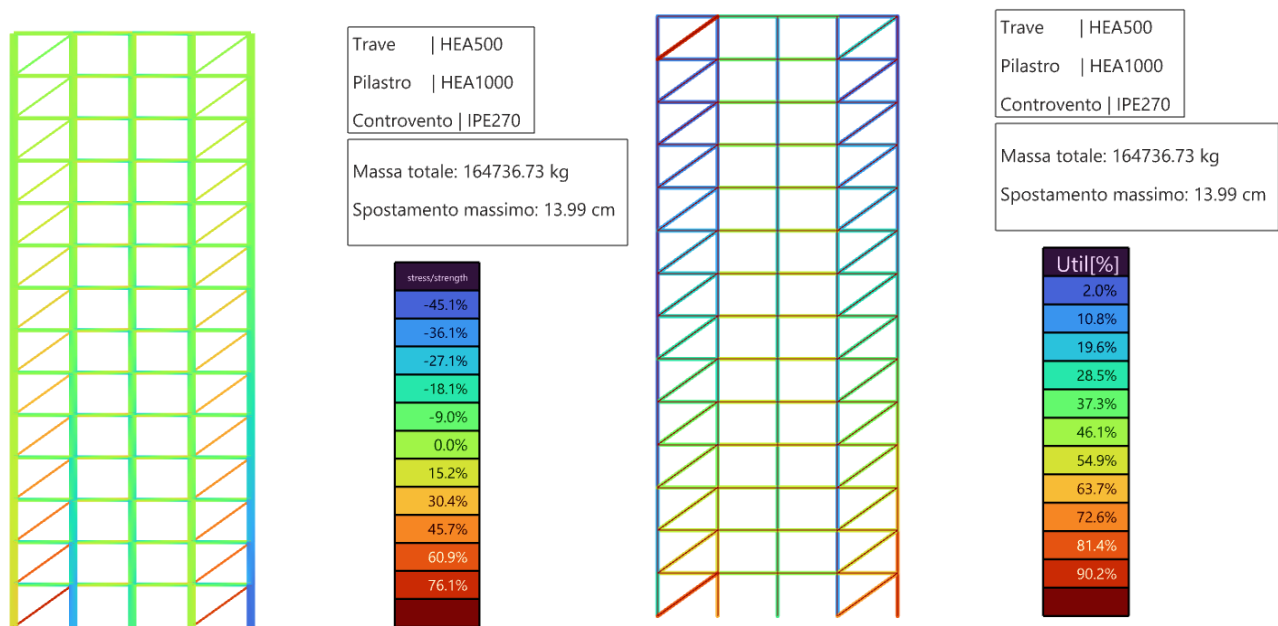


Figura 92 Caso studio 2.2 - Step 2 – Risultati

Step 3

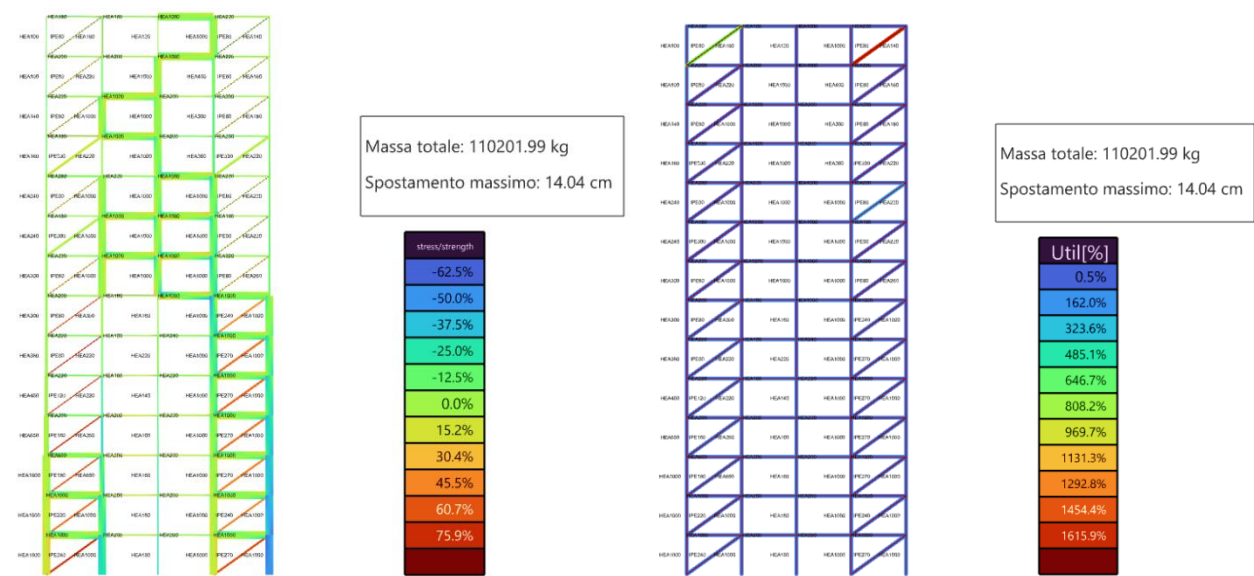


Figura 93 Caso studio 2.2 - Step 3 – Risultati

5.2.2.3. Caso studio 2.3 – Carico opposto

Step 1

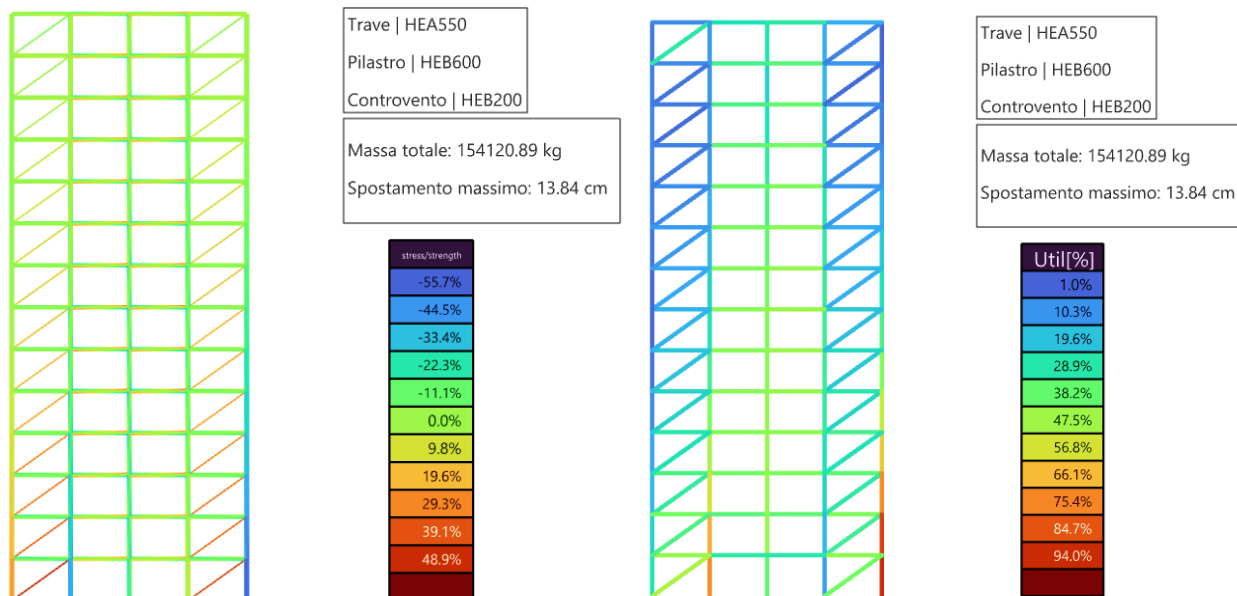


Figura 94 Caso studio 2.3 - Step 1 – Risultati

Step 2

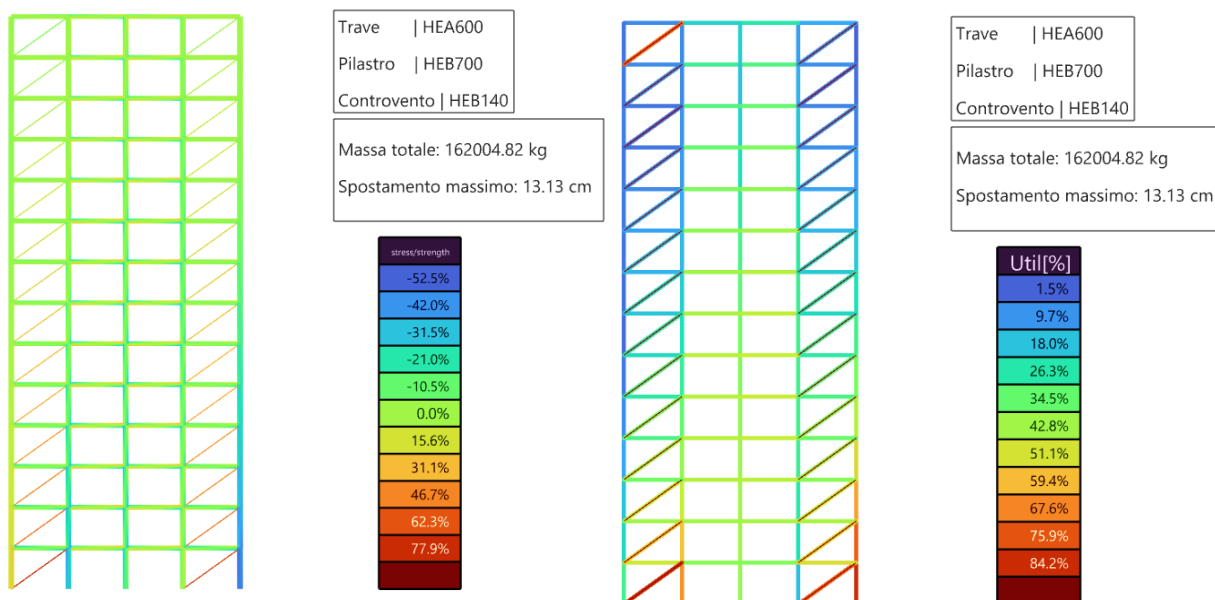


Figura 95 Caso studio 2.3 - Step 2 – Risultati

Step 3

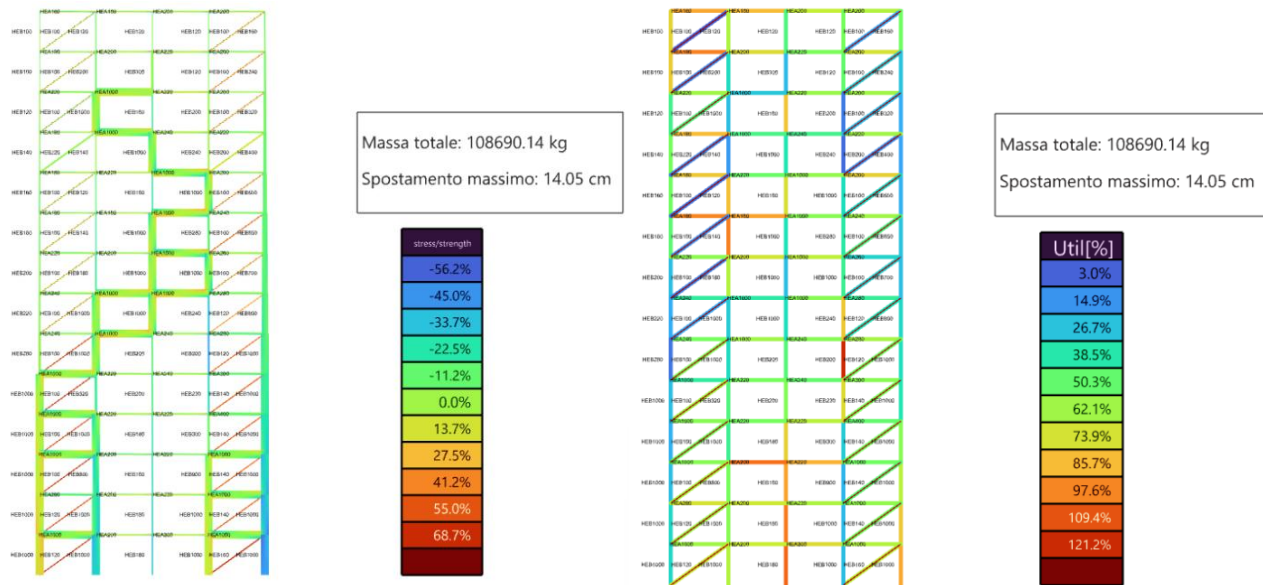


Figura 96 Caso studio 2.3 - Step 3 – Risultati

5.2.3. Caso studio 3

Nel caso studio 3, vengono mostrate le soluzioni determinate dal codice quando non è fissata la posizione dei controventi. Il solutore evolutivo dispone le aste in modo da contrastare lo spostamento e ridurre la massa. Si lavora sulla struttura 2 soggetta a carico laterale, fissando la tipologia di controvento a X. Sono proposte due tipi di analisi: una in cui si determina la posizione dei controventi “interi”, eliminandoli dalle campate in cui non sono necessarie (*agendo sulle campate*) ed un'altra in cui si parte sempre da controventi a X, ma si eliminano le singole aste che non servono (*agendo sulle aste*). In questo caso studio non viene vincolata la simmetria della struttura. Per tutte le analisi sono riproposti i tre step.

5.2.3.1. Caso studio 3.1 – Agendo sulle campate

Step 1

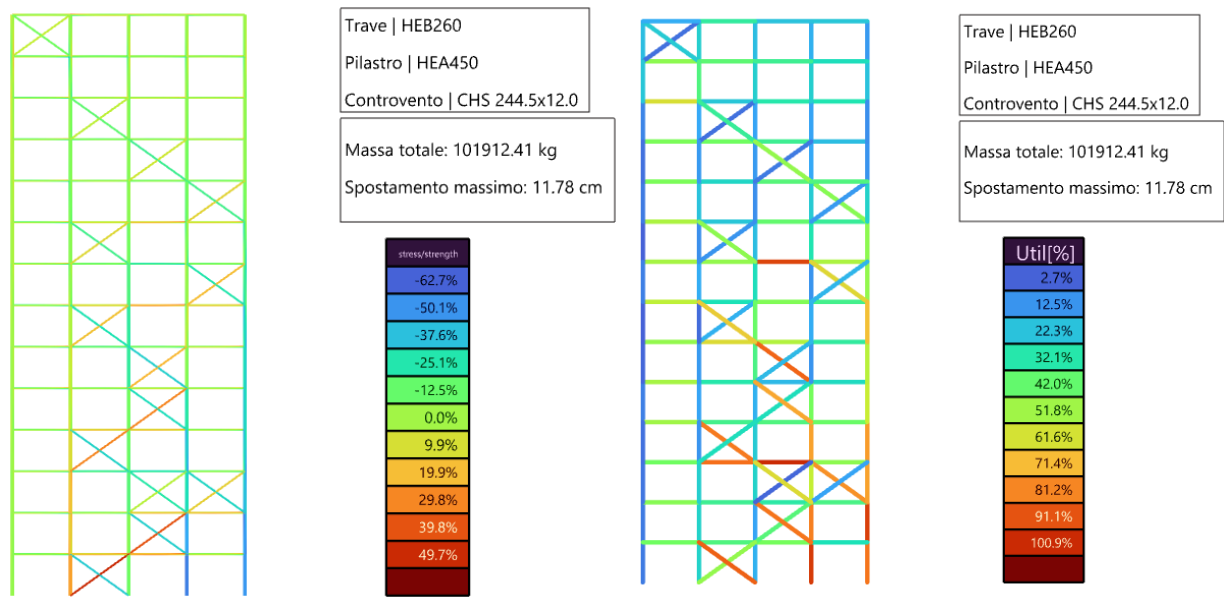


Figura 97 Caso studio 3.1 - Step 1 - Risultati

Step 2

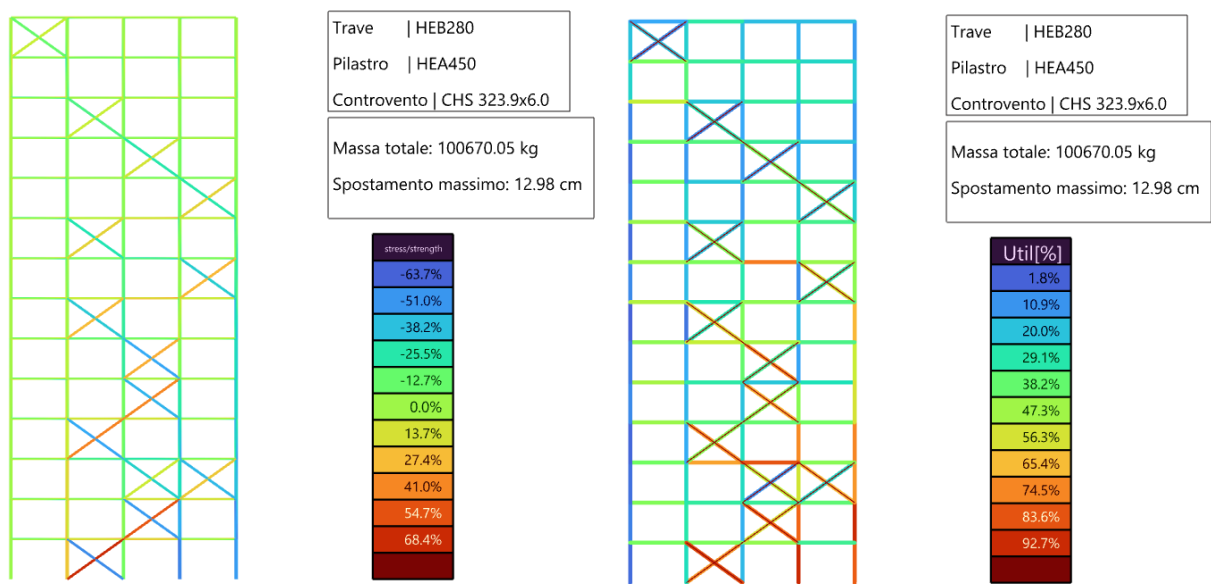


Figura 98 Caso studio 3.1 - Step 2 – Risultati

Step 3 (warning)

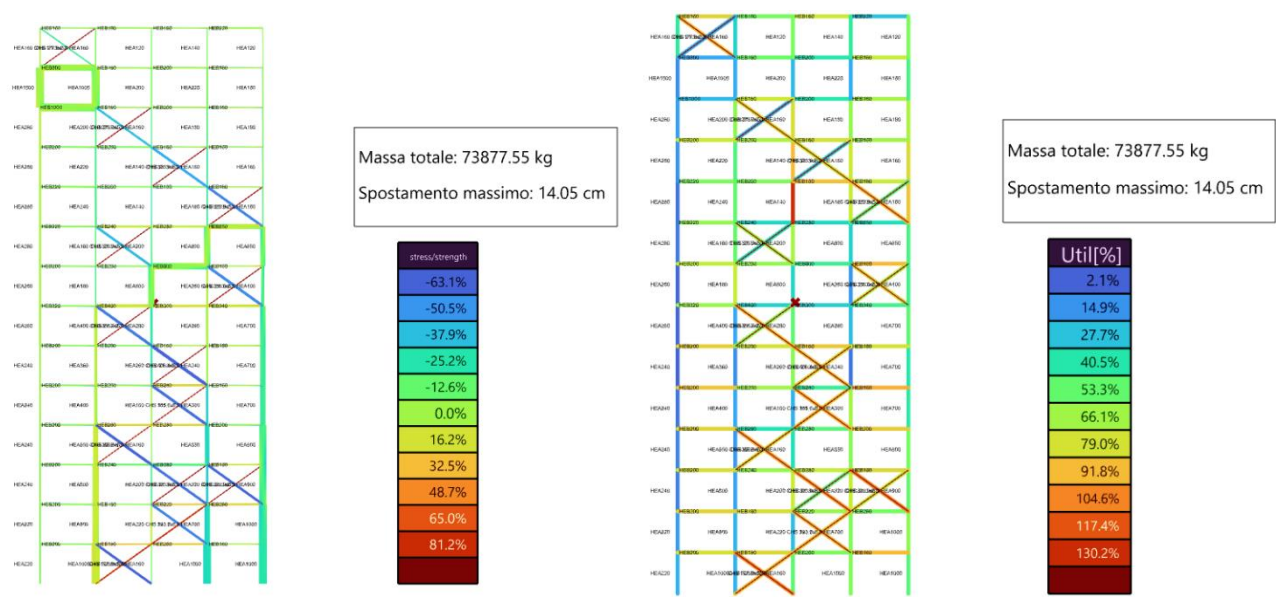


Figura 99 Caso studio 3.1 - Step 3- Risultati

5.2.3.2. *Caso studio 3.2 – Agendo sulle aste*

Step 1

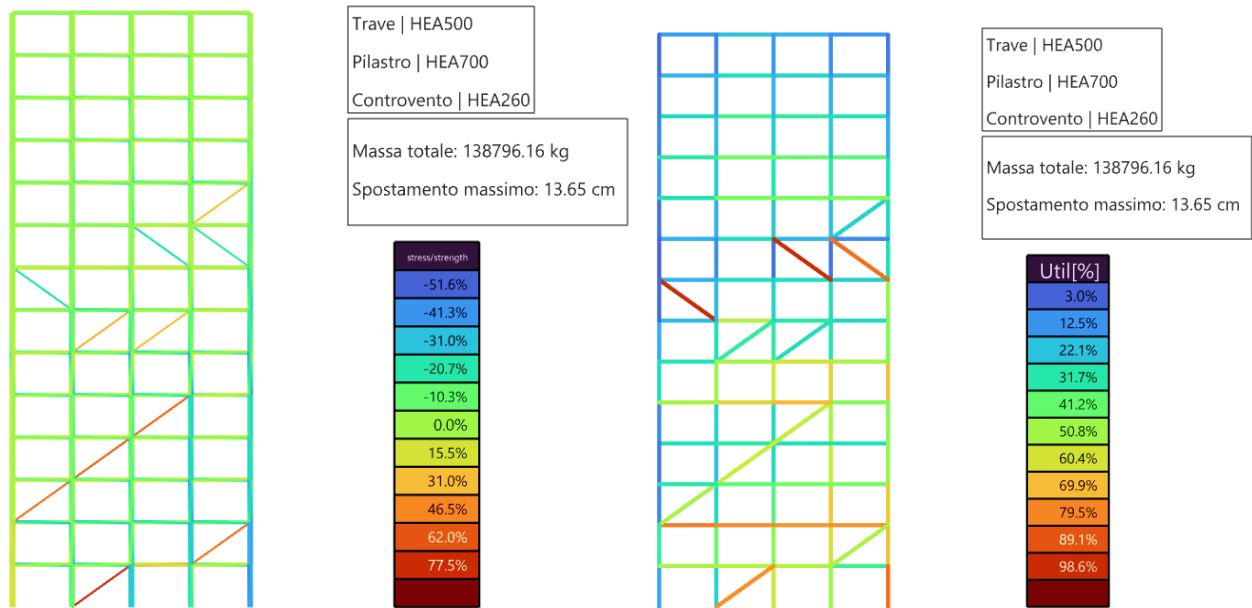


Figura 100 Caso studio 3.2 - Step 1 – Risultati

Step 2

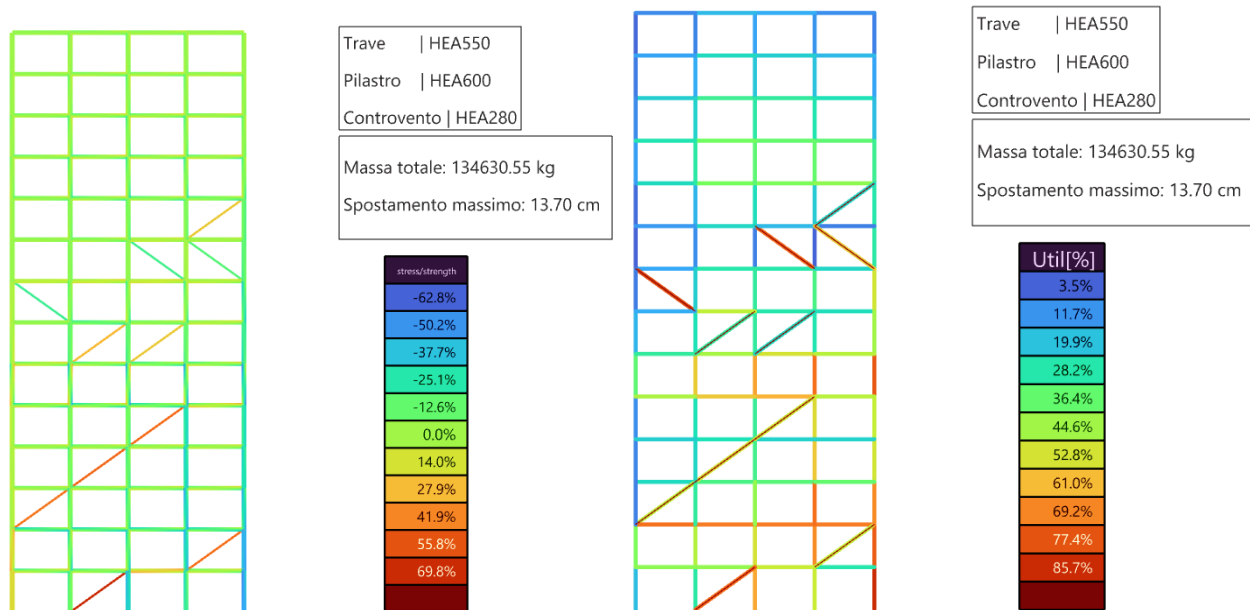


Figura 101 Caso studio 3.2 - Step 2 - Risultati

Step 3

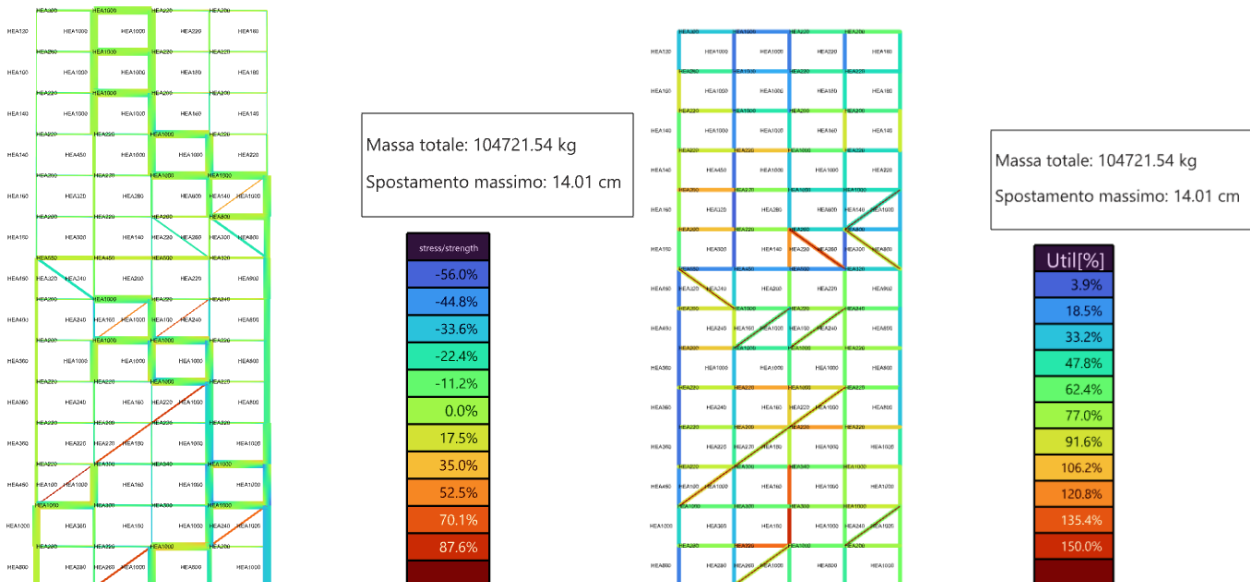


Figura 102 Caso studio 3.2 - Step 3 - Risultati

5.2.4. Caso studio 4

L'analisi eseguita è la stessa del caso studio 3, vincolando però la simmetria della struttura. Come per il precedente, si analizza la struttura 2 e si ripercorrono tutti gli step. L'analisi è performata applicando sia il carico laterale che il carico centrale.

5.2.4.1. Caso studio 4.1 – Agendo sui moduli (carico laterale)

Step 1

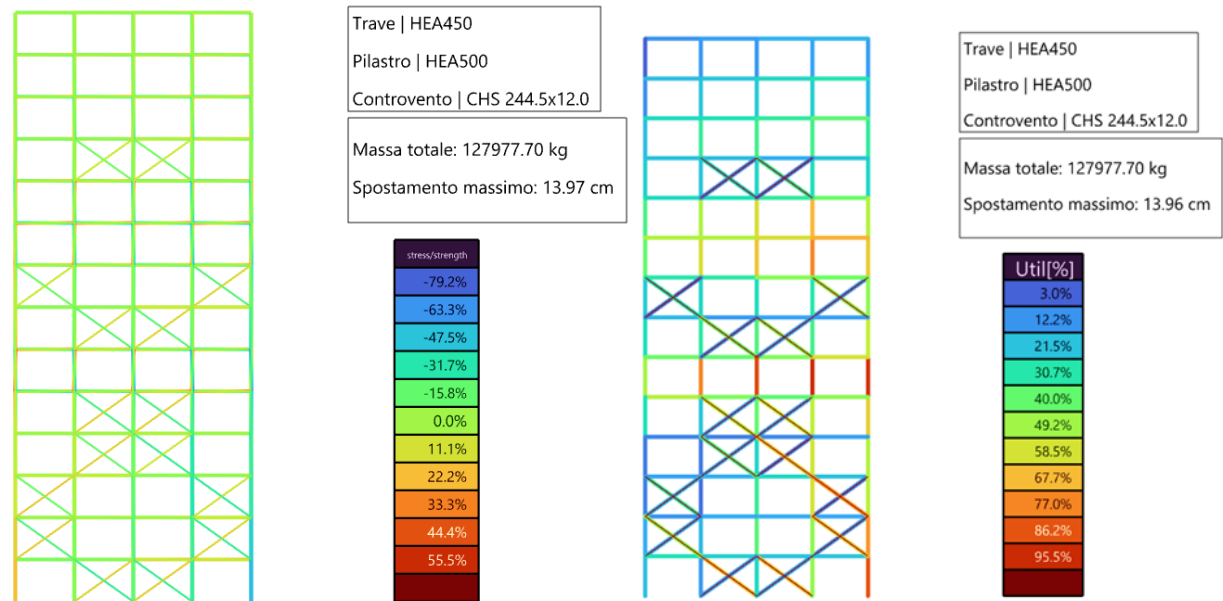


Figura 103 Caso studio 4.1 - Step 1 - Risultati

Step 2

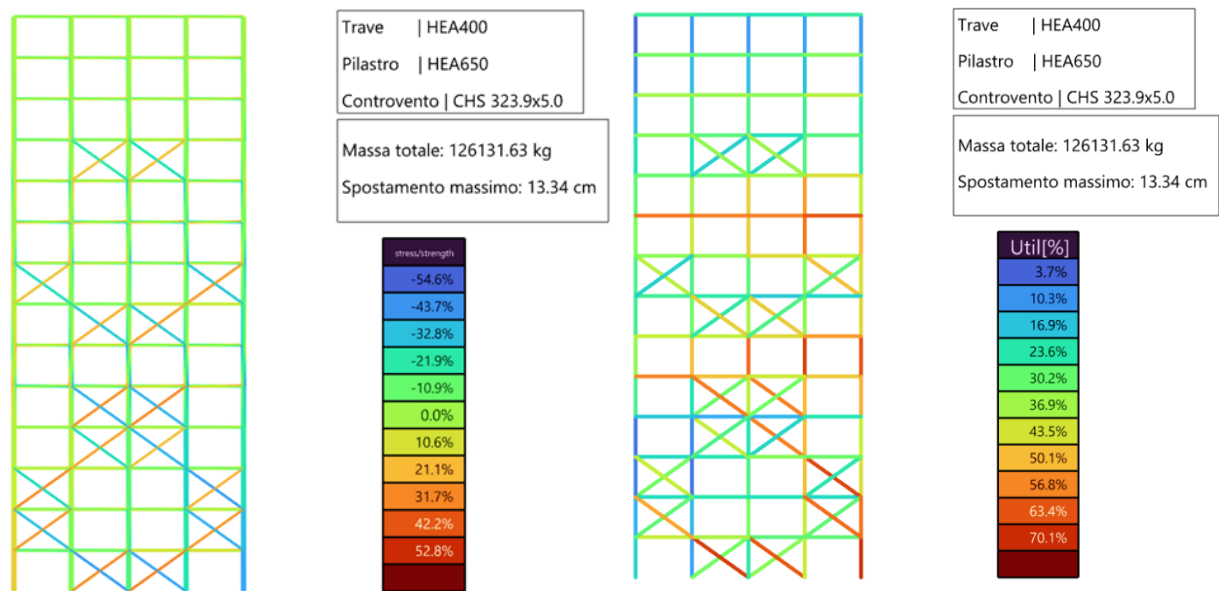


Figura 104 Caso studio 4.1 - Step 2 – Risultati

Step 3

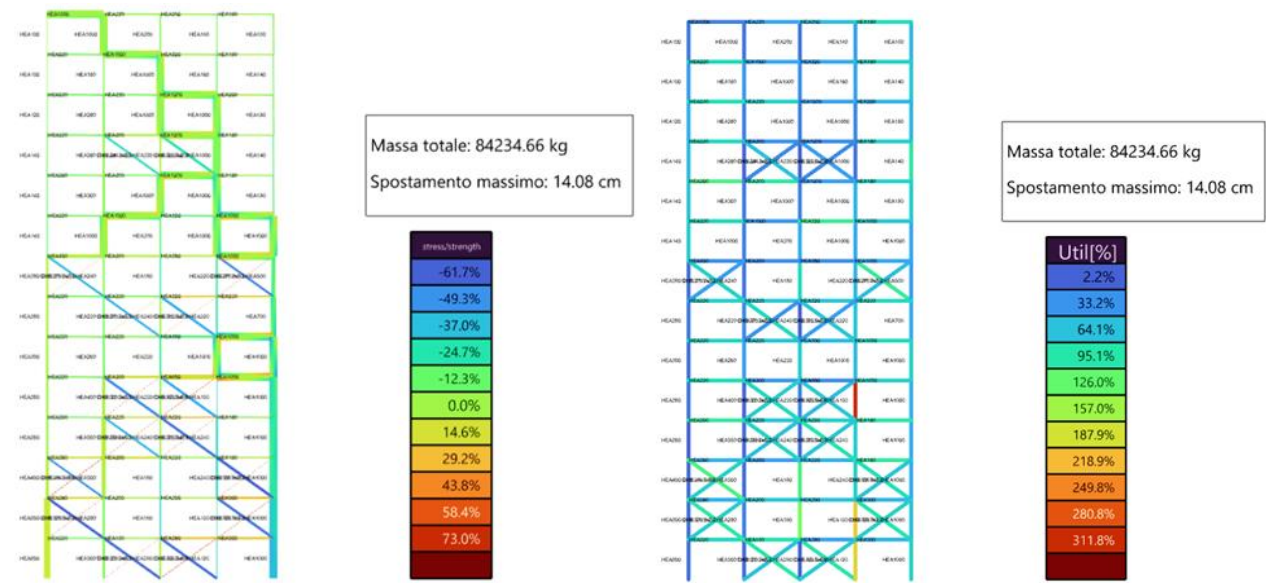


Figura 105 Caso studio 4.1 - Step 3 - Risultati

5.2.4.2. *Caso studio 4.2 – Agendo sui moduli (carico centrale)*

Step 1

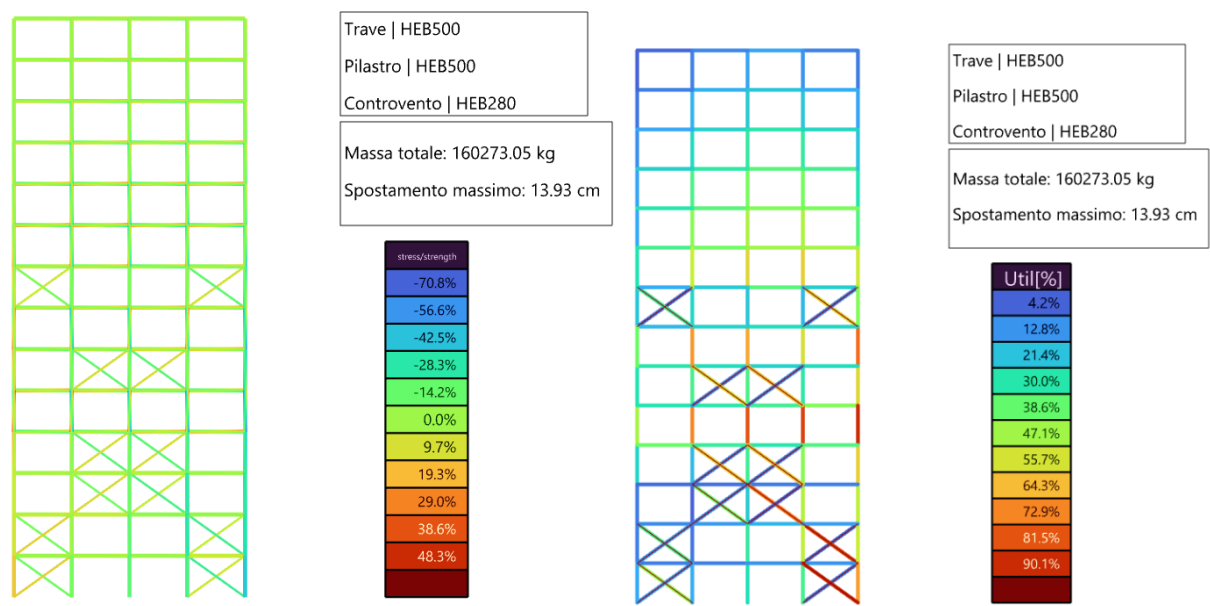


Figura 106 Caso studio 4.2 - Step 1 – Risultati

Step 2

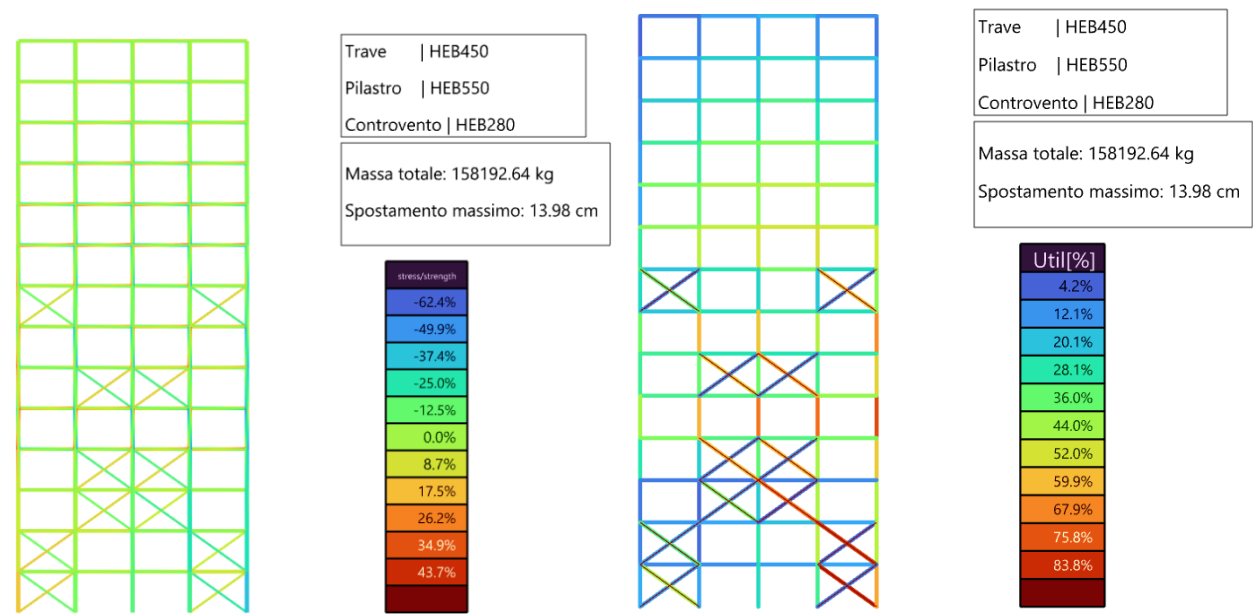


Figura 107 Caso studio 4.2 - Step 2 - Risultati

Step 3

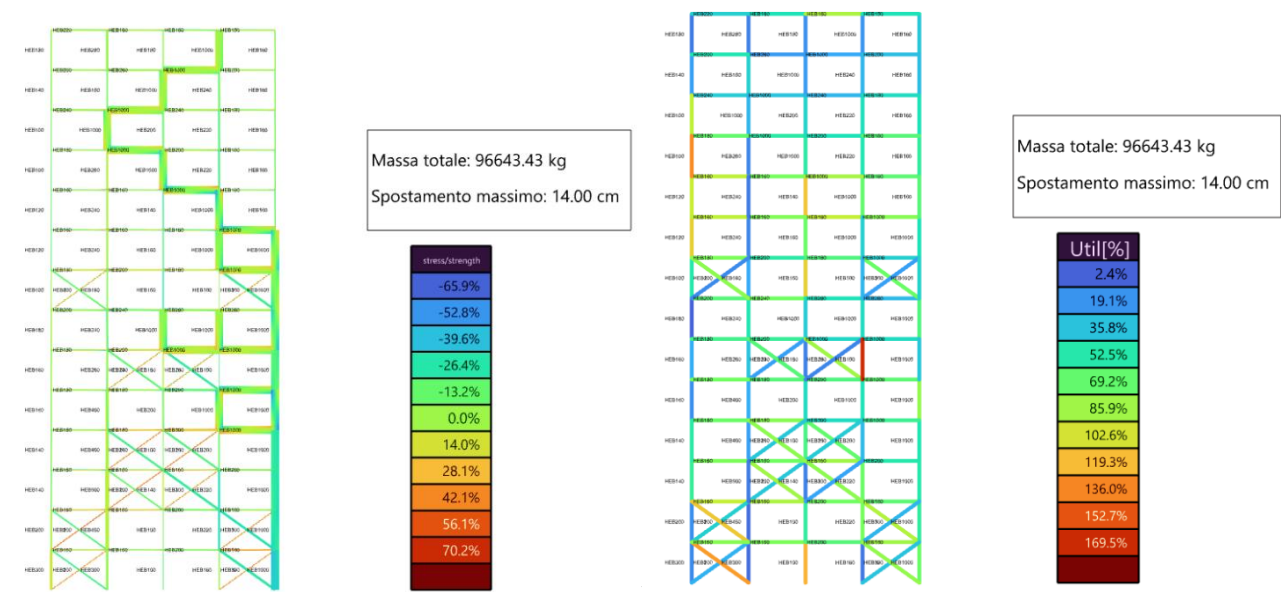


Figura 108 Caso studio 4.2 - Step 3 - Risultati

5.2.4.3. Caso studio 4.3 – Agendo sulle aste (carico laterale)

Step 1

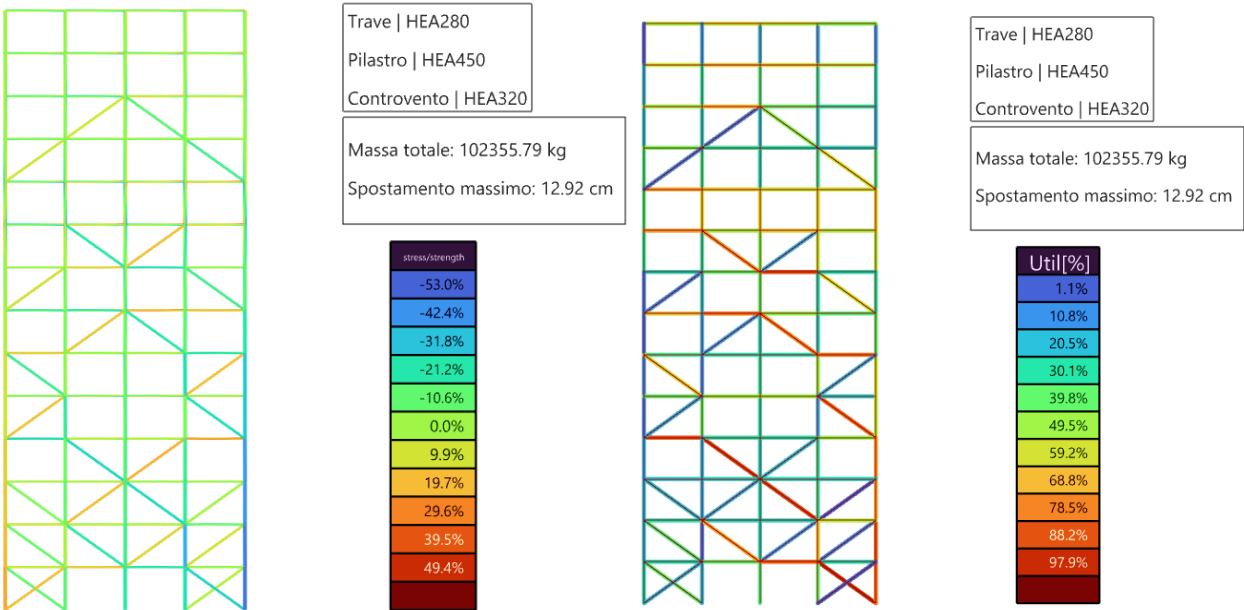


Figura 109 Caso studio 4.3 - Step 1 - Risultati

Step 2

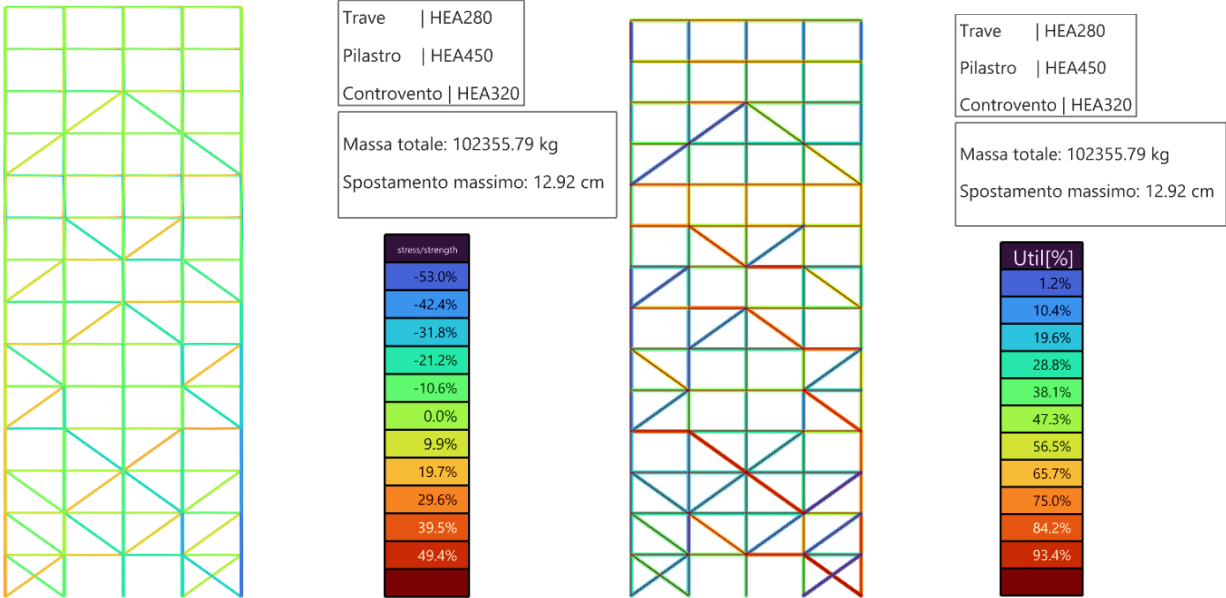


Figura 110 Caso studio 4.3 - Step 2 - Risultati

Step 3

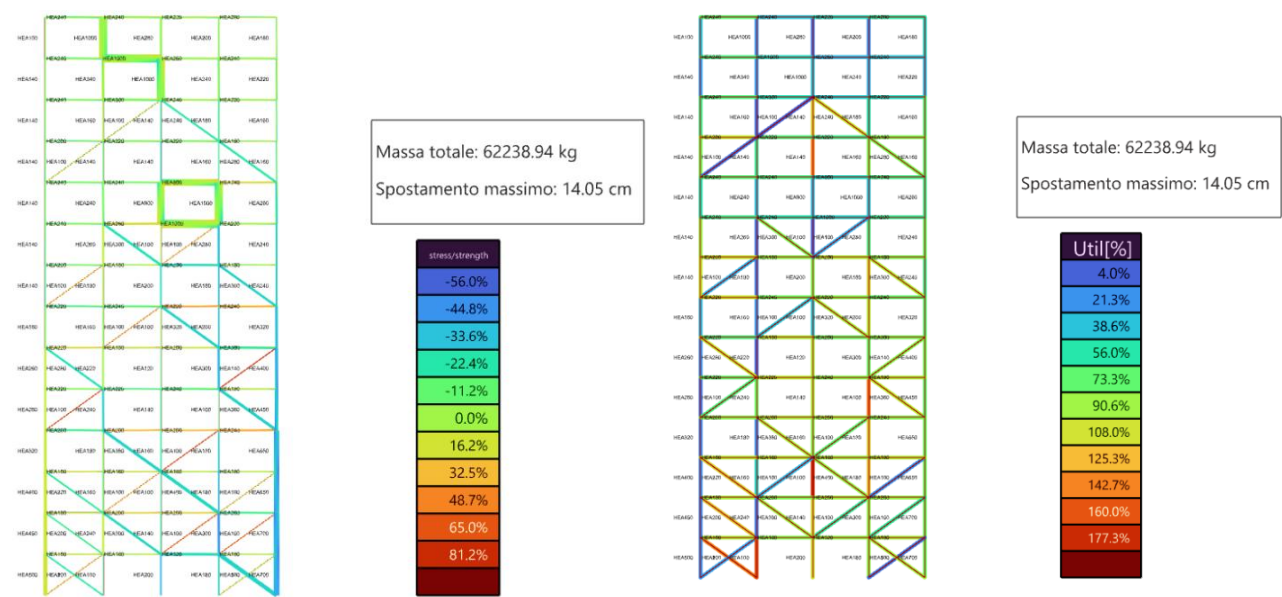


Figura 111 Caso studio 4.3 - Step 3 - Risultati

5.2.4.4. Caso studio 4.4 – Agendo sulle aste (carico centrale)

Step 1

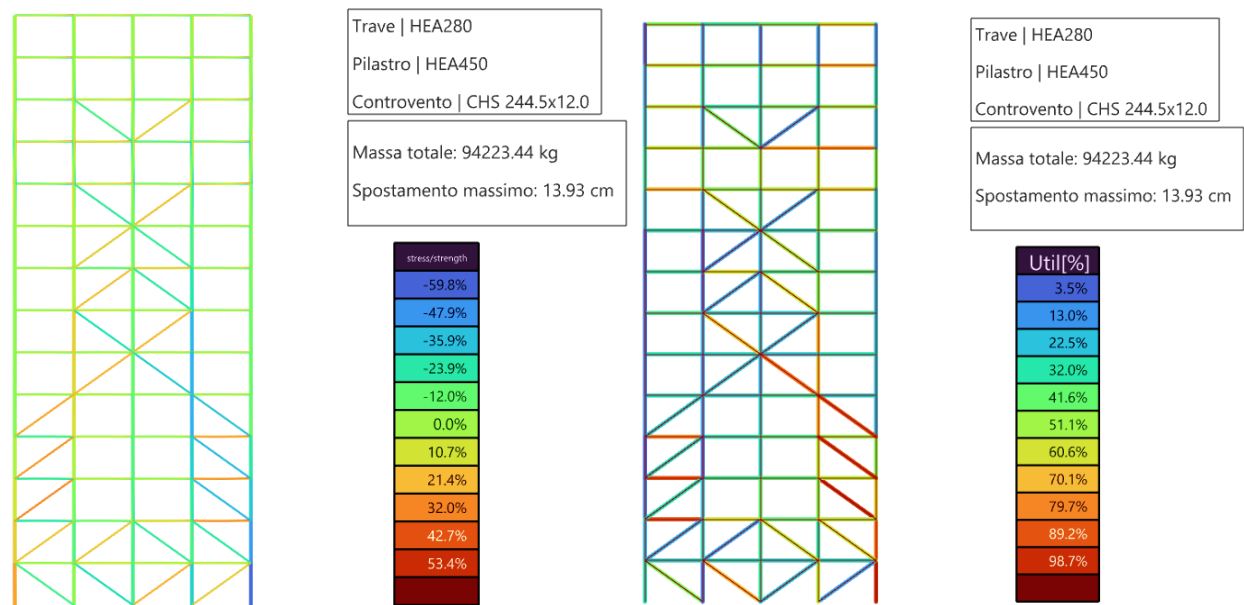


Figura 112 Caso studio 4.4 - Step 1 – Risultati

Step 2

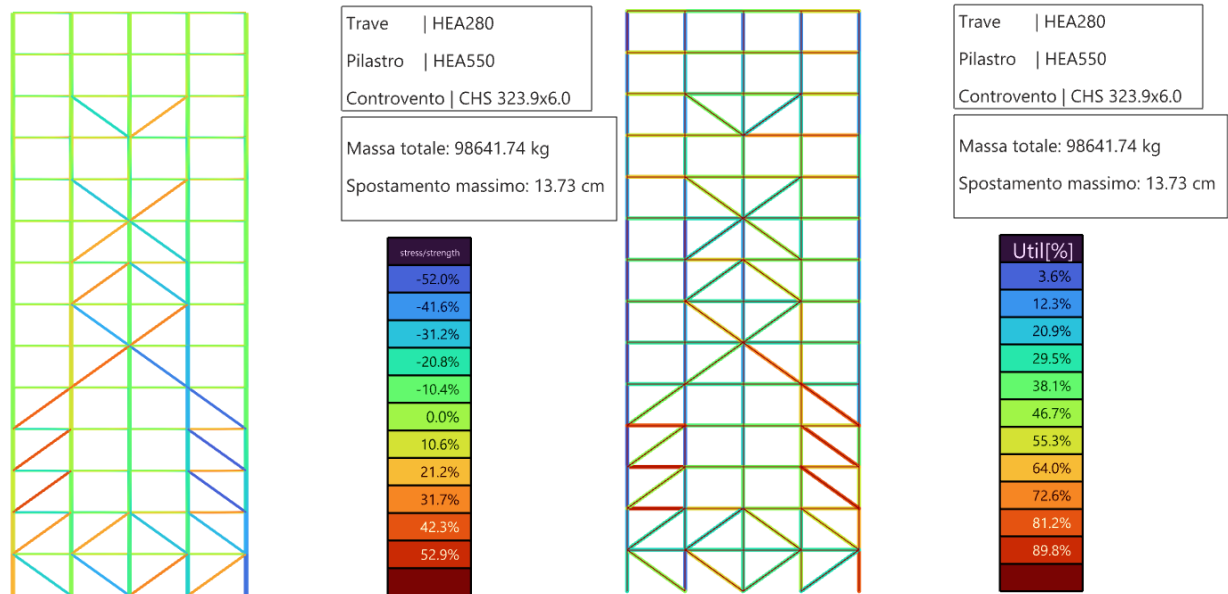


Figura 113 Caso studio 4.4 - Step 2 - Risultati

Step 3

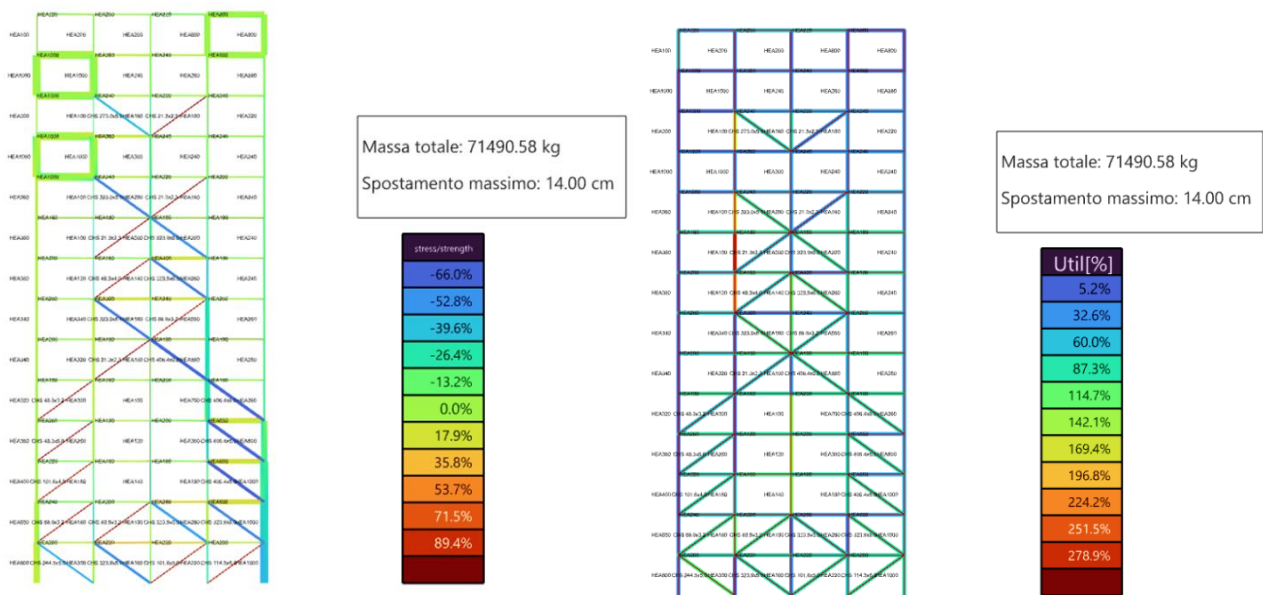


Figura 114 Caso studio 4.4 - Step 3 - Risultati

5.3. Casi studio - Discussione dei risultati

L'attività di ricerca condotta ha avuto come obiettivo quello di indagare il potenziale dell'integrazione tra strumenti di design parametrico e algoritmi evolutivi per l'ottimizzazione di strutture intelaiate controventate. Il framework adottato è costituito da *Rhino 8* e *Grasshopper* con *Karamba 3D* per l'analisi FEM. Esso ha permesso di sperimentare un processo iterativo e interattivo di ottimizzazione, fondato da un lato sull'uso di *Galapagos* per l'individuazione della disposizione e della tipologia dei sistemi di controvento, dall'altro sull'impiego del modulo *Optimize Cross Section* per la calibrazione delle sezioni. Questo impianto metodologico ha consentito di simulare diversi scenari progettuali, confrontando soluzioni simmetriche e asimmetriche, vincoli più o meno stringenti e configurazioni di carico differenziate.

L'analisi dei risultati mostra come gli algoritmi genetici, applicati tramite *Galapagos*, siano in grado di individuare soluzioni di disposizione e tipologia dei controventi che, se limitate a casi semplici e regolari, risultano non solo plausibili ma anche vantaggiose dal punto di vista della riduzione della massa strutturale. Nel caso studio 1, la disposizione dei controventi sulla Struttura 1 è fissata ed è proposta simmetrica in modo da garantire la sovrapposizione del centro di massa e del centro di rigidità per evitare sollecitazioni torsionali importanti. Il solutore evolutivo sceglie la tipologia di controventi costituita da un'unica asta diagonale tesa. Si può dire che la scelta sia coerente, tenendo in conto della forte penalizzazione del comportamento dell'acciaio in compressione. Ovviamente se si considera un carico vento spingente da sinistra, ma con possibilità di inversione da destra, la diagonale con pendenza opposta deve essere introdotta. Per quanto riguarda le sezioni ricavate dal solutore evolutivo, spuntano risultati validi e plausibili, non essendo un edificio eccessivamente alto e le dimensioni dei moduli, sia in larghezza che in altezza, piccole. Il rapporto stress/strength e il parametro utilization mostrano che i risultati sono assolutamente accettabili. Come prevedibile, gli elementi più sollecitati si trovano alla base e nei moduli in cui è assente il controvento. *Optimize Cross Section* conferma l'ordine di grandezza delle sezioni ottenute nello step 1 e, di conseguenza, anche la massa complessiva. La leggera differenza è dovuta a metodi di ottimizzazione diversi e verifiche più generali del componente di *Karamba 3D*. Nel terzo step, si rileva un funzionamento non sempre comprensibile di *Optimize Cross Section*. Si ottengono elementi con sezioni molto differenti tra di loro, ma accostati e convergenti allo stesso nodo. Costruttivamente parlando, questo risulta essere un problema. Dal risultato dell'utilisation si può però vedere come probabilmente non c'è stato un raggiungimento della convergenza, non segnalato tramite warning dal programma. L'unica interpretazione dei risultati dello step 3 che è possibile assumere, è la presenza di una sorta di percorso di carico definito. Infatti, a partire dal punto più in alto a sinistra, si può seguire un percorso costituito da elementi con sezioni maggiori. Questo è visibile nei primi piani e si disperde sempre di più verso il basso, dove la presenza delle azioni verticali e del taglio complessivo tende a coinvolgere una maggior quantità di aste. Risultati molto simili sono stati ottenuti per le altre due configurazioni di

carico. Non si rilevano particolari differenze. I risultati del caso studio 2 sono differenti, perché influenzati dalla luce delle travi molto elevata e dall'altezza del piano che può creare problemi di instabilità alle travi. Questo problema è visibile soprattutto nella prima disposizione dei carichi che provoca una sollecitazione troppo elevata per il pilastro in basso a destra. La compressione genera un problema di instabilità. Per questo motivo, la scelta ricade sul controvento a K in modo da ridurre la lunghezza libera di inflessione e, quindi, incrementare la resistenza. Diversamente capita per le altre due disposizioni di carico in cui le sollecitazioni sui pilastri sono maggiormente distribuite. Di conseguenza è sufficiente una sola diagonale in trazione. Nuovamente si nota che le sezioni proposte nello step 2 sono molto simili a quelle ottenute nello step precedente, mentre la convergenza non è assolutamente raggiunta nello step 3. Utilization molto maggiore di 1 rende non accettabili le soluzioni. La causa principale è sempre la mancata convergenza del componente. Se si paragonano i primi due casi studio, sicuramente saltano all'occhio le differenze tra le sezioni. Anche se la massa complessiva varia di poco, le sezioni soprattutto di controvento e pilastro crescono decisamente. Il problema è soprattutto legato all'incrementarsi del rischio di instabilità all'aumentare della luce libera. La massa, invece, non cambia in modo sostanziale, perché anche se nella struttura 2 le sezioni sono maggiori, il numero di elementi decresce. La Tabella 27 mostra questo confronto.

Disposizione carico	Elemento	Struttura 1	Struttura 2
Carico laterale	Travi	HEA360	HEB500
	Pilastri	HEB340	HEB500
	Controventi	IPE300	IPE360
	Massa [kg]	164016.89	166469.4
Carico centrale	Travi	IPE450	HEA550
	Pilastri	HEB340	HEA700
	Controventi	HEA180	IPE360
	Massa [kg]	142016.77	150493.5
Carico opposto	Travi	IPE450	HEA550
	Pilastri	HEB340	HEB600
	Controventi	HEA180	HEB200
	Massa [kg]	142016.77	154120.9

Tabella 27 Confronto Struttura 1 e Struttura 2

Il caso studio 3 rappresenta il massimo grado di libertà proposto in questo elaborato. Fissata la configurazione di controvento, si lascia il solutore libero di scegliere la miglior disposizione delle aste. Nonostante le sezioni siano assolutamente coerenti, il problema risulta subito visibile a primo impatto. Non è definita una vera logica per la quale le aste sono state disposte. Il processo esplorativo tende a privilegiare soluzioni che riducono estremamente la massa, ma senza un vero e proprio motivo ingegneristico. Anche se emerge questo problema, la stabilità locale, globale e la resistenza di tutti gli elementi è verificata, come mostrano anche il rapporto stress/strength e utilization. Allo stesso

modo, anche agendo sulle campate, emerge lo stesso problema. In questo caso, però, una motivazione è parzialmente visibile. Essendo il carico disposto a sinistra, si intravede nei primi 5 moduli una sorta di diagonale, fino a poi concentrare i controventi sul lato destro. Qui l'effetto della compressione è molto elevato e la presenza dei controventi la contrasta. Per quanto riguarda le sezioni determinate da *Optimize Cross Section*, sono presenti gli stessi problemi evidenziati in precedenza.

L'ultima analisi mostra come la presenza della simmetria porta risultati decisamente più accettabili e sensate. A partire dal caso studio 4.3 e 4.4, in cui si lavora sulle aste con simmetria e il carico applicato lateralmente, si può vedere che la maggior parte di aste sono presenti nella parte inferiore della struttura per affrontare il maggior taglio presente. A salire poi si trova una distribuzione meno comprensibile, ma in cui si può comunque notare una sorta di percorso di carico. Per quanto riguarda una disposizione centrale del carico vento, la struttura risulta essere sensata, oltre ad essere esteticamente apprezzabile. Il carico coinvolge inizialmente la parte centrale della struttura in alto e scendendo si allarga sempre di più, fino a richiedere controventi in tutta la sua larghezza per la presenza del taglio importante. Questo segue proprio la disposizione dei controventi. Gli stessi aspetti si possono notare nel caso in cui si agisce sull'intera campata. Per quanto riguarda *Optimize Cross Section*, i commenti sono ripetitivi perché i problemi risultano essere gli stessi. In questi casi studio, alcune volte, oltre a non raggiungere la convergenza, segnala anche il warning. La stranezza è sul fatto che non trovi una soluzione simile a quella degli step precedenti.

In conclusione, si può evincere che la presenza di simmetria si conferma un fattore determinante, poiché introduce un ordine che guida l'algoritmo verso soluzioni equilibrate. Al contrario, quando la simmetria viene meno, il processo esplorativo diventa meno stabile e tende a privilegiare soluzioni che riducono drasticamente la massa ma che si rivelano irrealizzabili da un punto di vista ingegneristico.

L'utilizzo del modulo *Optimize Cross Section* ha aggiunto un ulteriore livello di valutazione. Nel caso in cui le sezioni fossero assegnate per famiglie omogenee (pilastri, travi e controventi), i risultati hanno mostrato una buona coerenza, confermando che l'algoritmo è in grado di fornire un ordine di grandezza corretto delle sezioni necessarie. Questo approccio, sebbene semplificato, si è dimostrato utile per garantire una certa regolarità e un grado di realismo maggiore rispetto alla libera variazione elemento per elemento. Quando, invece, ogni singolo elemento è stato autorizzato ad assumere una sezione indipendente, i risultati sono rapidamente degenerati in soluzioni prive di senso fisico, con valori di utilizzazione enormemente superiori ai limiti consentiti. In questo caso, come annotato nel file di lavoro, l'utilization ha raggiunto valori che non permettono l'interpretazione dei risultati come esito numerico ma piuttosto come manifestazione evidente della mancata convergenza del processo.

Un'osservazione rilevante emerge dal confronto tra i casi di carico. Laddove il carico era applicato lateralmente, le soluzioni tendevano a mantenere una certa stabilità, mentre in presenza di carico in mezzzeria, soprattutto nella Struttura 2, l'algoritmo non è riuscito a produrre risultati convergenti. Questo indica non solo la sensibilità del metodo alle condizioni statiche imposte, ma anche la difficoltà dei GA a gestire scenari di carico che introducono forti non linearità nella distribuzione degli sforzi.

Dal punto di vista metodologico, l'insieme delle sperimentazioni suggerisce una riflessione più ampia sul ruolo degli algoritmi genetici nel campo dell'ottimizzazione strutturale. I GA, come mostrato dalla letteratura (*Deb, 2001; Kicinger et al., 2005*), sono strumenti estremamente versatili ed efficaci nella gestione di problemi complessi e discreti. Tuttavia, quando vengono applicati all'ottimizzazione topologica pura, mostrano limiti intrinseci. Rispetto a metodi consolidati come il SIMP (*Bendsøe & Sigmund, 2003*), l'ESO e il BESO (*Xie & Steven, 1993; Huang & Xie, 2010*), i GA presentano una minore efficienza nella definizione di configurazioni materialmente e geometricamente coerenti, tendendo a privilegiare l'esplorazione globale dello spazio delle soluzioni a scapito della regolarità locale. Ciò si traduce in una maggiore probabilità di soluzioni formalmente valide ma prive di utilità costruttiva. In questo senso, *Galapagos*, pur non essendo stato progettato per applicazioni ingegneristiche avanzate, si rivela un ottimo strumento di esplorazione progettuale, capace di fornire intuizioni preziose nelle fasi preliminari, ma inadeguato come unico metodo per problemi di ottimizzazione rigorosa.

CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'esperienza condotta ha dimostrato come l'integrazione tra strumenti di design parametrico e algoritmi evolutivi possa aprire nuove prospettive nella progettazione strutturale, consentendo di esplorare in tempi ridotti un numero elevato di configurazioni alternative. La sequenza metodologica adottata ha chiarito che *Galapagos* trova il suo punto di forza nell'individuare disposizioni e tipologie di controventi, mentre *Optimize Cross Section*, se applicato in maniera controllata attraverso famiglie omogenee, fornisce indicazioni attendibili sulle sezioni. Le anomalie riscontrate nello step più libero confermano, d'altro canto, che la completa deregolamentazione del problema conduce rapidamente a risultati non interpretabili.

Le criticità osservate non devono essere lette come un fallimento, bensì come indicazioni sul corretto impiego di questi strumenti. Gli strumenti impiegati infatti, non vanno intesi come sostituti dei metodi consolidati di ottimizzazione topologica, bensì come strumenti complementari di design exploration. Il loro valore risiede nella capacità di stimolare processi creativi e di orientare le prime fasi della progettazione verso soluzioni che coniughino leggerezza ed efficienza, pur nel rispetto dei vincoli normativi.

In prospettiva, il lavoro potrebbe evolvere attraverso l'integrazione di algoritmi più specifici per la topological optimization, come il SIMP o il BESO, eventualmente combinati con GA in strategie ibride. Un'ulteriore evoluzione consisterebbe nell'adozione di approcci multi-obiettivo, come l'NSGA-II (*Deb et al., 2002*), capaci di bilanciare la riduzione della massa con altri criteri di progetto, quali la regolarità, la ridondanza, la robustezza e la sostenibilità ambientale. L'implementazione di tecniche surrogate e di apprendimento automatico potrebbe inoltre ridurre i costi computazionali, permettendo di estendere l'approccio a modelli tridimensionali più complessi e a scenari di carico realistici. Infine, in futuro, per avere un parametro di riferimento, verranno integrate le analisi di un modello base (ad esempio con tutti i telai) e con un predimensionamento manuale da normativa.

In conclusione, l'esperienza svolta mostra come l'uso di ambienti parametrici e di algoritmi evolutivi debba essere interpretato non come una soluzione definitiva, ma come parte di un percorso più ampio che integra strumenti di esplorazione, metodi di ottimizzazione avanzata e criteri progettuali multidisciplinari. È in questa prospettiva che il lavoro trova il suo valore: non tanto nei singoli risultati numerici, ma nella dimostrazione di un processo che apre la strada a nuove modalità di interazione tra ingegneria strutturale e progettazione computazionale.

APPENDICE A

Nell’Appendice A vengono riportati i risultati del capitolo 3.8, in cui è stato convalidato il codice scritto per l’analisi della struttura. Nelle tabelle, la convenzione dei segni usata è quella prevista da Grasshopper riportata nella Figura 54.

Invece, la numerazione degli elementi rispecchia la seguente disposizione.

45	44	43	42	
25	24	23	22	21
41	40	39	38	
20	19	18	17	16
37	36	35	34	
15	14	13	12	11
33	32	31	30	
10	9	8	7	6
29	28	27	26	
5	4	3	2	1

CONTROVENTO K									
Elemento	N [kN]			M+ [kNm]			M- [kNm]		
	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %
1	-117,15	-116,87	0,24%	0	0,00	-	-27,43	-27,48	0,18%
2	-538,54	-536,80	0,32%	0	0,00	-	-45,41	-45,57	0,35%
3	482,52	484,10	0,33%	0	0,00	-	-47,5	-47,65	0,32%
4	-10,97	-10,84	1,19%	0	0,00	-	-41,92	-42,00	0,19%
5	48,07	48,84	1,60%	0	0,00	-	-28,43	-28,49	0,21%
6	-87,11	-86,87	0,28%	17,74	17,81	0,39%	-24,94	-25,00	0,24%
7	-307,13	-307,78	0,21%	27,34	27,43	0,33%	-36,2	-36,32	0,33%
8	265,95	263,43	0,95%	24,48	24,56	0,33%	-37,56	-37,67	0,29%
9	-6,37	-6,31	0,94%	35,95	36,12	0,47%	-40,46	-40,60	0,35%
10	30,56	31,15	1,93%	12,23	12,28	0,41%	-20,87	-20,91	0,19%
11	-59,66	-59,45	0,35%	15,49	15,55	0,39%	-22,96	-23,01	0,22%
12	-163,37	-164,46	0,67%	21,7	21,77	0,32%	-30,48	-30,58	0,33%
13	131,47	131,23	0,18%	20,37	20,43	0,29%	-32,26	-32,36	0,31%
14	-3,78	-3,75	0,79%	28,87	28,98	0,38%	-35,48	-35,59	0,31%
15	16,80	17,23	2,56%	12,51	12,57	0,48%	-19,19	-19,23	0,21%
16	-35,49	-35,34	0,42%	11,48	11,52	0,35%	-19,57	-19,60	0,15%
17	-69,31	-68,70	0,88%	14,09	14,14	0,35%	-24,59	-24,66	0,28%
18	46,61	46,51	0,21%	12,89	12,94	0,39%	-26,28	-26,36	0,30%
19	-2,03	-2,02	0,49%	22,32	22,43	0,49%	-28,97	-29,05	0,28%
20	6,73	6,89	2,38%	7,73	7,77	0,52%	-16,46	-16,50	0,24%
21	-15,38	-15,29	0,59%	7,61	7,65	0,53%	-18,23	-18,26	0,16%
22	-14,59	-14,78	1,30%	5,82	5,83	0,17%	-16,13	-16,16	0,19%
23	3,91	3,90	0,26%	5,17	5,18	0,19%	-17,59	-17,63	0,23%
24	-0,87	-0,86	1,15%	15,69	15,77	0,51%	-26,4	-26,49	0,34%
25	0,84	0,85	1,19%	2,78	2,80	0,72%	-10,87	-10,89	0,18%
26	3,81	3,83	0,52%	45,17	45,29	0,27%	-42,7	-42,86	0,37%
27	-50,79	-50,78	0,02%	30,05	30,14	0,30%	-29,68	-29,78	0,34%
28	-59,79	-59,86	0,12%	42,3	42,44	0,33%	-39,99	-40,14	0,38%
29	-51,17	-51,18	0,02%	37,88	37,99	0,29%	-40,66	-40,78	0,30%
30	-1,06	-1,06	0,00%	40,43	40,55	0,30%	-38,41	-38,51	0,26%
31	-38,13	-38,08	0,13%	19,49	19,54	0,26%	-19,04	-19,10	0,32%
32	-46,63	-46,61	0,04%	38,88	39,01	0,33%	-37,31	-37,46	0,40%
33	-49,65	-49,65	0,00%	32,02	32,12	0,31%	-33,38	-33,48	0,30%
34	-1,85	-1,86	0,54%	34,44	34,53	0,26%	-32,88	-32,91	0,09%
35	-8,26	-8,30	0,48%	11,69	11,72	0,26%	-11,15	-11,18	0,27%
36	-44,86	-44,84	0,04%	34	34,10	0,29%	-32,22	-32,32	0,31%
37	-48,12	-48,12	0,00%	25,58	25,66	0,31%	-26,91	-27,00	0,33%
38	-1,30	-1,30	0,00%	27,18	27,25	0,26%	-25,97	-26,05	0,31%
39	-35,11	-35,05	0,17%	4,44	4,44	0,00%	-3,83	-3,84	0,26%
40	-45,06	-45,05	0,02%	27,62	27,71	0,33%	-26,03	-26,11	0,31%
41	-47,36	-47,36	0,00%	18,63	18,68	0,27%	-19,24	-19,30	0,31%
42	-6,46	-6,48	0,31%	18,23	18,26	0,16%	-18,33	-18,38	0,27%
43	-27,63	-27,55	0,29%	2,36	2,36	0,00%	-2,2	-2,22	0,91%
44	-36,07	-36,01	0,17%	19,95	20,00	0,25%	-17,05	-17,12	0,41%
45	-46,59	-46,58	0,02%	9,35	9,37	0,21%	-10,87	-10,89	0,18%
46	-167,69	-167,70	0,01%	0	0	-	0	0	-
47	166,00	166,12	0,07%	0	0	-	0	0	-
48	138,94	138,86	0,06%	0	0	-	0	0	-
49	-141,87	-141,56	0,22%	0	0	-	0	0	-
50	-103,73	-103,58	0,14%	0	0	-	0	0	-
51	101,64	101,60	0,04%	0	0	-	0	0	-
52	93,86	93,66	0,21%	0	0	-	0	0	-
53	-97,30	-97,09	0,22%	0	0	-	0	0	-
54	-72,87	-72,75	0,16%	0	0	-	0	0	-
55	70,55	70,53	0,03%	0	0	-	0	0	-
56	63,84	63,68	0,25%	0			0		
57	-66,62	-66,34	0,42%	0			0		
58	-45,51	-45,44	0,15%	0			0		
59	43,65	43,67	0,05%	0			0		
60	35,96	35,83	0,36%	0			0		
61	-38,59	-38,34	0,65%	0			0		
62	-18,29	-18,24	0,27%	0			0		
63	16,51	16,57	0,36%	0			0		
64	9,83	9,74	0,92%	0			0		
65	-11,34	-11,13	1,85%	0			0		

CONTROVENTO V ROVESCIA									
Elemento	N [kN]			M+ [kNm]			M -[kNm]		
	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %
1	-134,24	-133,91	0,25%	0	0,00	-	-52,05	-52,15	0,19%
2	-268,80	-267,40	0,52%	0	0,00	-	-70,62	-70,74	0,17%
3	215,34	215,17	0,08%	0	0,00	-	-70,64	-70,75	0,16%
4	-20,49	-20,13	1,76%	0	0,00	-	-74,35	-74,47	0,16%
5	73,34	74,20	1,17%	0	0,00	-	-53,68	-53,80	0,22%
6	-92,69	-92,39	0,32%	14,7	14,73	0,20%	-34,66	-34,68	0,06%
7	-151,49	-150,78	0,47%	41,92	42,01	0,21%	-54,57	-54,69	0,22%
8	106,95	106,93	0,02%	40,88	41,02	0,34%	-54,45	-54,57	0,22%
9	-13,14	-12,94	1,52%	43,83	43,99	0,37%	-57,41	-57,54	0,23%
10	42,84	43,40	1,31%	10,57	10,59	0,19%	-31,77	-31,79	0,06%
11	-59,49	-59,24	0,42%	16,21	16,27	0,37%	-29,48	-29,52	0,14%
12	-70,45	-69,81	0,91%	29,63	29,71	0,27%	-41,62	-41,70	0,19%
13	36,48	36,56	0,22%	30,34	30,43	0,30%	-42,22	-42,30	0,19%
14	-8,95	-8,89	0,67%	33,77	33,87	0,30%	-45,77	-45,86	0,20%
15	22,00	22,41	1,86%	14,24	14,31	0,49%	-26,98	-27,01	0,11%
16	-32,99	-32,81	0,55%	9,44	9,48	0,42%	-23,32	-23,34	0,09%
17	-20,57	-20,21	1,75%	18,78	18,81	0,16%	-30,45	-30,50	0,16%
18	-2,29	-2,28	0,44%	19,42	19,49	0,36%	-31,21	-31,27	0,19%
19	-5,47	-5,45	0,37%	22,89	22,97	0,35%	-34,27	-34,33	0,18%
20	7,99	8,04	0,63%	6,97	7,00	0,43%	-21,19	-21,22	0,14%
21	-13,41	-13,31	0,75%	3,1	3,13	0,97%	-15,33	-15,34	0,07%
22	0,82	0,83	1,22%	7,18	7,20	0,28%	-17,61	-17,63	0,11%
23	-12,46	-12,36	0,80%	8,19	8,23	0,49%	-18,89	-18,92	0,16%
24	-2,76	-2,75	0,36%	11,98	12,00	0,17%	-24,15	-24,20	0,21%
25	0,92	0,93	0,61%	0,11	0,11	0,91%	-10,8	-10,82	0,19%
26	-0,67	-0,68	1,49%	66,75	66,89	0,21%	-61,43	-61,59	0,26%
27	-111,59	-111,54	0,04%	51,1	51,22	0,23%	-51,78	-51,89	0,21%
28	-53,89	-53,91	0,04%	59,74	59,88	0,23%	-58,4	-58,56	0,27%
29	-47,16	-47,15	0,02%	59,78	59,91	0,22%	-64,25	-64,39	0,22%
30	-0,92	-0,91	1,09%	50,87	50,98	0,22%	-48,07	-48,19	0,25%
31	-74,50	-74,38	0,16%	36,13	36,21	0,22%	-36,43	-36,52	0,25%
32	-44,29	-44,28	0,02%	48,35	48,47	0,25%	-47,01	-47,15	0,30%
33	-49,72	-49,74	0,04%	44,17	44,24	0,16%	-46,01	-46,10	0,20%
34	-3,23	-3,24	0,31%	38,92	38,99	0,18%	-36,56	-36,65	0,25%
35	-58,16	-58,07	0,15%	23,84	23,89	0,21%	-23,96	-24,02	0,25%
36	-41,14	-41,11	0,07%	37,68	37,77	0,24%	-36,3	-36,41	0,30%
37	-46,73	-46,72	0,02%	32,36	32,42	0,19%	-33,95	-34,02	0,21%
38	-3,58	-3,59	0,28%	26,43	26,47	0,15%	-24,83	-24,81	0,08%
39	-44,70	-44,73	0,07%	12,79	12,81	0,16%	-12,62	-12,68	0,48%
40	-40,43	-40,42	0,02%	26,79	26,85	0,22%	-25,55	-25,63	0,31%
41	-45,69	-45,68	0,02%	20,7	20,73	0,14%	-21,3	-21,35	0,23%
42	-4,61	-4,62	0,22%	15,33	15,34	0,07%	-14,36	-14,39	0,21%
43	-31,47	-31,42	0,16%	3,25	3,24	0,31%	-2,67	-2,67	0,00%
44	-38,24	-38,20	0,10%	16,22	16,24	0,12%	-14,47	-14,51	0,28%
45	-47,27	-47,26	0,02%	9,68	9,69	0,10%	-10,8	-10,82	0,19%
46	210,56	210,40	0,08%	0	0	-	0	0	-
47	-212,73	-212,54	0,09%	0	0	-	0	0	-
48	128,45	128,18	0,21%	0	0	-	0	0	-
49	-130,55	-130,52	0,02%	0	0	-	0	0	-
50	89,44	89,23	0,23%	0	0	-	0	0	-
51	-91,27	-91,04	0,25%	0	0	-	0	0	-
52	56,02	55,88	0,25%	0	0	-	0	0	-
53	-57,53	-57,37	0,28%	0	0	-	0	0	-
54	25,22	25,14	0,32%	0	0	-	0	0	-
55	-26,34	-26,40	0,23%	0	0	-	0	0	-

CONTROVENTO /									
Elemento	N [kN]			M+ [kNm]			M -[kNm]		
	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %
1	-144,04	-143,73	0,22%	0	0,00	-	-48,36	-48,46	0,21%
2	-441,83	-440,21	0,37%	0	0,00	-	-66,11	-66,28	0,26%
3	199,17	198,94	0,12%	0	0,00	-	-68,85	-68,98	0,19%
4	-20,66	-20,53	0,63%	0	0,00	-	-73,3	-73,42	0,16%
5	74,33	75,09	1,02%	0	0,00	-	-52,86	-52,98	0,23%
6	-102,26	-101,98	0,27%	18,7	18,71	0,05%	-36,32	-36,36	0,11%
7	-247,53	-246,19	0,54%	45,01	45,24	0,51%	-55,62	-55,81	0,34%
8	93,13	93,06	0,08%	39,41	39,51	0,25%	-52,35	-52,43	0,15%
9	-13,39	-13,15	1,79%	43,67	43,83	0,37%	-56,58	-56,71	0,23%
10	44,19	44,76	1,29%	10,7	10,74	0,37%	-31,11	-31,13	0,06%
11	-67,11	-66,68	0,64%	17,92	17,99	0,39%	-31,14	-31,18	0,13%
12	-135,06	-134,45	0,45%	30,66	30,78	0,39%	-42,48	-42,60	0,28%
13	25,21	25,26	0,20%	29,76	29,82	0,20%	-40,88	-40,93	0,12%
14	-9,17	-9,03	1,53%	34,49	34,60	0,32%	-45,9	-45,99	0,20%
15	23,35	23,75	1,71%	14,92	14,90	0,13%	-26,97	-27,01	0,15%
16	-38,24	-38,07	0,44%	11,87	11,91	0,34%	-25,3	-25,32	0,08%
17	-59,37	-58,82	0,93%	20,41	20,52	0,54%	-31,72	-31,81	0,28%
18	-9,79	-9,69	1,02%	18,68	18,71	0,16%	-30,2	-30,21	0,03%
19	-5,61	-5,54	1,25%	23,71	23,79	0,34%	-34,71	-34,78	0,20%
20	8,99	9,13	1,56%	7,6	7,64	0,53%	-21,43	-21,46	0,14%
21	-15,87	-15,77	0,63%	5,99	6,02	0,50%	-19,44	-19,46	0,10%
22	-15,19	-14,95	1,58%	8,96	9,03	0,78%	-19,79	-19,86	0,35%
23	-14,55	-14,45	0,69%	7,4	7,40	0,00%	-17,55	-17,56	0,06%
24	-2,74	-2,71	1,09%	13,07	13,12	0,38%	-25,49	-25,53	0,16%
25	1,37	1,39	1,46%	0,84	0,86	2,38%	-11,63	-11,65	0,17%
26	1,66	1,66	0,00%	67,06	67,20	0,21%	-61,92	-62,07	0,24%
27	-162,34	-162,10	0,15%	49,2	49,28	0,16%	-48,94	-49,05	0,22%
28	-53,98	-54,00	0,04%	59,32	59,47	0,25%	-57,81	-57,97	0,28%
29	-47,24	-47,22	0,04%	59,15	59,29	0,24%	-63,57	-63,71	0,22%
30	-1,49	-1,48	0,67%	54,24	54,34	0,18%	-51,51	-51,64	0,25%
31	-110,99	-110,79	0,18%	34,77	34,84	0,20%	-33,72	-33,80	0,24%
32	-45,05	-45,05	0,00%	48,39	48,51	0,25%	-46,88	-47,02	0,30%
33	-50,02	-50,03	0,02%	44,19	44,29	0,23%	-46,03	-46,12	0,20%
34	-2,97	-2,98	0,34%	43,01	43,09	0,19%	-40,77	-40,87	0,25%
35	-79,45	-79,27	0,23%	22,12	22,15	0,14%	-21,3	-21,36	0,28%
36	-41,29	-41,27	0,05%	38,26	38,36	0,26%	-36,66	-36,77	0,30%
37	-46,78	-46,77	0,02%	32,95	33,02	0,21%	-34,57	-34,67	0,29%
38	-2,93	-2,94	0,34%	31,29	31,34	0,16%	-29,77	-29,81	0,13%
39	-52,37	-52,56	0,36%	10,91	10,91	0,00%	-10,02	-10,05	0,30%
40	-40,89	-40,87	0,05%	27,57	27,64	0,25%	-26,15	-26,21	0,23%
41	-45,86	-45,85	0,02%	21,64	21,68	0,18%	-22,27	-22,32	0,22%
42	-6,36	-6,37	0,16%	19,44	19,46	0,10%	-18,84	-18,86	0,11%
43	-31,00	-30,97	0,10%	0,95	0,94	1,05%	-0,47	-0,46	1,28%
44	-37,24	-37,21	0,08%	17,26	17,56	1,74%	-15,05	-15,09	0,27%
45	-46,88	-46,87	0,02%	10,44	10,44	0,00%	-11,63	-11,65	0,17%
46	262,04	262,05	0,00%	0	0	-	0	0	-
47	155,74	155,60	0,09%	0	0	-	0	0	-
48	108,04	107,99	0,05%	0	0	-	0	0	-
49	66,06	66,11	0,08%	0	0	-	0	0	-
50	26,40	26,50	0,38%	0	0	-	0	0	-

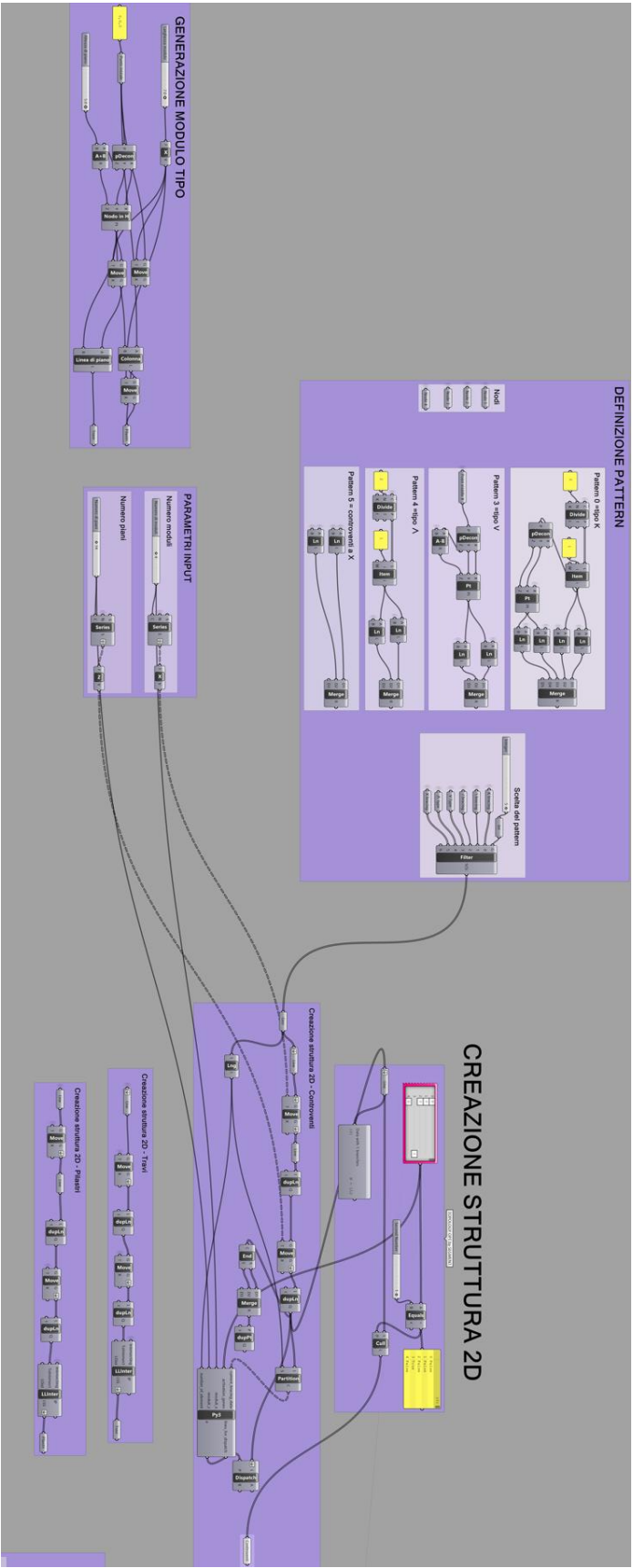
CONTROVENTO \									
Elemento	N [kN]			M+ [kNm]			M -[kNm]		
	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %
1	-133,77	-133,45	0,24%	0	0,00	-	-51,27	-51,37	0,20%
2	-256,55	-255,09	0,57%	0	0,00	-	-69,09	-69,21	0,17%
3	391,15	390,70	0,12%	0	0,00	-	-65,66	-65,77	0,17%
4	-11,71	-11,63	0,68%	0	0,00	-	-70,11	-70,24	0,19%
5	73,50	74,27	1,05%	0	0,00	-	-49,64	-49,76	0,24%
6	-92,91	-92,62	0,31%	14,18	14,21	0,21%	-33,4	-33,42	0,06%
7	-140,57	-139,53	0,74%	40,14	40,28	0,35%	-52,2	-52,31	0,21%
8	204,79	204,41	0,19%	42,41	42,56	0,35%	-54,08	-54,21	0,24%
9	-5,51	-5,49	0,36%	46,43	46,60	0,37%	-58,35	-58,50	0,26%
10	44,03	44,61	1,32%	12,79	12,82	0,23%	-31,67	-31,70	0,09%
11	-60,12	-59,87	0,42%	16,69	16,76	0,42%	-29,11	-29,14	0,10%
12	-61,16	-60,49	1,10%	29,12	29,20	0,27%	-40,19	-40,26	0,17%
13	101,96	101,77	0,19%	30,42	30,51	0,30%	-42,02	-42,11	0,21%
14	-2,88	-2,84	1,39%	35,63	35,74	0,31%	-47,35	-47,46	0,23%
15	23,11	23,52	1,77%	14,58	14,65	0,48%	-26,9	-26,94	0,15%
16	-33,62	-33,43	0,57%	9,75	9,79	0,41%	-23,09	-23,11	0,09%
17	-14,25	-13,88	2,60%	18,02	18,08	0,33%	-29,27	-29,31	0,14%
18	36,76	36,70	0,16%	20,2	20,27	0,35%	-31,59	-31,65	0,19%
19	-1,28	-1,27	0,78%	25,39	25,48	0,35%	-36,35	-36,42	0,19%
20	8,81	9,06	2,84%	7,68	7,72	0,52%	-21,52	-21,55	0,14%
21	-13,82	-13,72	0,72%	3,67	3,69	0,54%	-15,87	-15,88	0,06%
22	3,18	3,22	1,26%	6,42	6,44	0,31%	-16,16	-16,17	0,06%
23	3,87	3,88	0,26%	9,3	9,34	0,43%	-20,19	-20,23	0,20%
24	-0,64	-0,63	0,94%	15,17	15,24	0,46%	-28,31	-28,37	0,21%
25	1,20	1,21	0,83%	0,84	0,86	1,79%	-11,57	-11,58	0,09%
26	-0,92	-0,93	1,09%	64,45	65,59	1,77%	-60,31	-60,47	0,27%
27	108,48	108,25	0,21%	48,92	49,02	0,20%	-48,04	-48,16	0,25%
28	-57,37	-57,41	0,07%	60,03	60,18	0,25%	-58,54	-58,71	0,29%
29	-48,70	-48,69	0,02%	57,99	58,13	0,24%	-62,43	-62,58	0,24%
30	-0,45	-0,44	1,33%	50,09	50,18	0,18%	-47,42	-47,54	0,25%
31	65,80	65,69	0,17%	33,9	33,97	0,21%	-33,15	-33,24	0,27%
32	-43,81	-43,79	0,05%	51,35	51,49	0,27%	-49,77	-49,93	0,32%
33	-49,26	-49,27	0,02%	44,21	44,31	0,23%	-46,25	-46,35	0,22%
34	-3,24	-3,25	0,31%	38,86	38,93	0,18%	-36,66	-36,75	0,25%
35	35,54	35,39	0,42%	21,56	21,59	0,14%	-20,62	-20,67	0,24%
36	-41,62	-41,60	0,05%	41,6	41,71	0,26%	-39,98	-40,11	0,33%
37	-46,93	-46,92	0,02%	32,75	32,83	0,24%	-34,59	-34,67	0,23%
38	-3,33	-3,25	2,40%	26,76	26,80	0,15%	-25,28	-25,34	0,24%
39	8,62	8,52	1,16%	10,41	10,41	0,00%	-9,42	-9,48	0,64%
40	-41,24	-41,22	0,05%	31,47	31,55	0,25%	-30	-30,12	0,40%
41	-45,80	-45,79	0,02%	21,52	21,66	0,65%	-22,36	-22,41	0,22%
42	-4,88	-4,89	0,20%	15,87	15,88	0,06%	-15,23	-15,20	0,20%
43	-10,53	-10,54	0,09%	0,93	0,93	0,32%	0	0,00	-
44	-36,03	-35,99	0,11%	20,65	20,69	0,19%	-18,41	-18,47	0,33%
45	-46,90	-46,89	0,02%	9,9	9,90	0,00%	-11,57	-11,58	0,09%
46	-263,68	-263,41	0,10%	0	0	-	0	0	-
47	-157,42	-157,65	0,15%	0	0	-	0	0	-
48	-109,45	-109,16	0,26%	0	0	-	0	0	-
49	-67,36	-67,16	0,30%	0	0	-	0	0	-
50	-27,64	-27,53	0,40%	0	0	-	0	0	-

CONTROVENTO X									
Elemento	N [kN]			M+ [kNm]			M- [kNm]		
	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %
1	-115,84	-115,56	0,24%	0	0,00	-	-27,45	-27,51	0,22%
2	-424,23	-422,58	0,39%	0	0,00	-	-37,24	-37,31	0,19%
3	369,40	369,07	0,09%	0	0,00	-	-37,26	-37,31	0,13%
4	-11,49	-11,45	0,35%	0	0,00	-	-41,82	-41,90	0,19%
5	47,36	48,16	1,69%	0	0,00	-	-28,66	-28,73	0,24%
6	-86,57	-86,32	0,29%	16,77	16,83	0,36%	-24,26	-24,32	0,25%
7	-233,91	-232,61	0,56%	31,48	31,61	0,41%	-35,04	-35,15	0,31%
8	190,16	190,35	0,10%	30,37	30,50	0,43%	-34,55	-34,67	0,35%
9	-6,35	-6,23	1,89%	34,84	34,99	0,43%	-39,6	-39,73	0,33%
10	30,05	30,65	2,00%	11,61	11,65	0,34%	-20,28	-20,32	0,20%
11	-59,31	-59,10	0,35%	15,74	15,81	0,44%	-22,81	-22,87	0,26%
12	-113,29	-112,41	0,78%	22,59	22,57	0,09%	-28,71	-28,78	0,24%
13	80,35	80,21	0,17%	22,73	22,81	0,35%	-28,76	-28,88	0,42%
14	-3,88	-3,85	0,77%	28,92	29,03	0,38%	-35,22	-35,34	0,34%
15	16,57	17,00	2,60%	12,61	12,68	0,56%	-19	-19,05	0,26%
16	-35,24	-35,09	0,43%	11,45	11,49	0,35%	-19,51	-19,55	0,21%
17	-37,36	-36,84	1,39%	15,64	15,70	0,38%	-22,58	-22,64	0,27%
18	15,79	15,76	0,19%	15,82	15,88	0,38%	-22,88	-22,95	0,31%
19	-2,16	-2,14	0,93%	22,24	22,33	0,40%	-28,84	-28,93	0,31%
20	6,62	6,73	1,66%	7,71	7,75	0,52%	-16,36	-16,40	0,24%
21	-15,18	-15,09	0,59%	7,55	7,59	0,53%	-18,01	-18,04	0,17%
22	-3,11	-3,10	0,32%	7,81	7,84	0,38%	-15,31	-15,34	0,20%
23	-6,67	-6,64	0,45%	8,27	8,30	0,36%	-15,94	-15,98	0,25%
24	-0,81	-0,81	0,62%	15,59	15,66	0,45%	-26,15	-26,23	0,31%
25	5,95	5,93	0,34%	2,74	2,76	0,73%	-10,79	-10,82	0,28%
26	3,40	3,41	0,29%	44,23	44,35	0,27%	-40,99	-41,13	0,34%
27	-25,25	-25,29	0,16%	27,73	27,79	0,22%	-27,05	-27,13	0,30%
28	-58,96	-59,01	0,08%	40,58	40,70	0,30%	-39,08	-39,22	0,36%
29	-50,81	-50,81	0,00%	37,57	37,67	0,27%	-40,26	-40,38	0,30%
30	-0,62	-0,62	0,00%	40,01	40,12	0,27%	-38,13	-38,26	0,34%
31	-21,77	-21,78	0,05%	19,5	19,55	0,26%	-18,61	-18,67	0,32%
32	-47,36	-47,35	0,02%	38,67	38,80	0,34%	-36,98	-37,12	0,38%
33	-49,93	-49,94	0,02%	31,54	31,64	0,32%	-32,89	-32,99	0,30%
34	-1,90	-1,91	0,53%	34,27	34,36	0,26%	-32,71	-32,82	0,34%
35	-21,27	-21,27	0,00%	11,63	11,65	0,17%	-10,76	-10,80	0,37%
36	-44,83	-44,83	0,00%	33,85	33,96	0,32%	-32,07	-32,20	0,41%
37	-48,11	-48,11	0,00%	25,39	25,46	0,28%	-26,7	-26,79	0,34%
38	-1,35	-1,35	0,00%	27,07	27,13	0,22%	-25,9	-25,98	0,31%
39	-21,39	-21,39	0,00%	4,5	4,50	0,00%	-3,58	-3,60	0,56%
40	-45,03	-45,06	0,07%	27,57	27,65	0,29%	-25,94	-26,05	0,42%
41	-47,37	-47,36	0,02%	18,49	18,54	0,27%	-19,1	-19,16	0,31%
42	-6,39	-6,41	0,31%	18,01	18,04	0,17%	-17,86	-17,91	0,28%
43	-20,28	-20,27	0,05%	3,52	3,53	0,28%	-2,54	-2,57	1,18%
44	-36,18	-36,13	0,14%	19,46	19,50	0,21%	-16,84	-16,90	0,36%
45	-46,62	-46,60	0,04%	9,31	9,33	0,21%	-10,79	-10,82	0,28%
46	155,68	155,39	0,19%	0	0	-	0	0	-
47	-158,74	-158,66	0,05%	0	0	-	0	0	-
48	96,82	96,65	0,18%	0	0	-	0	0	-
49	-101,05	-100,86	0,19%	0	0	-	0	0	-
50	67,05	66,91	0,21%	0	0	-	0	0	-
51	-70,71	-70,56	0,21%	0	0	-	0	0	-
52	39,54	39,44	0,25%	0	0	-	0	0	-
53	-42,60	-42,72	0,28%	0	0	-	0	0	-
54	12,20	12,13	0,57%	0	0	-	0	0	-
55	-15,07	-14,99	0,53%	0	0	-	0	0	-

CONTROVENTO V									
Elemento	N [kN]			M+ [kNm]			M -[kNm]		
	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %	Grasshopper	SAP2000	err. %
1	-148,88	-148,59	0,19%	0	0,00	-	-54,89	-55,00	0,20%
2	-410,69	-408,99	0,41%	0	0,00	-	-73,93	-74,05	0,17%
3	358,48	358,06	0,12%	0	0,00	-	-73,34	-73,46	0,17%
4	-13,15	-13,09	0,46%	0	0,00	-	-78,31	-78,45	0,18%
5	80,71	81,51	0,99%	0	0,00	-	-56,07	-56,20	0,23%
6	-104,60	-104,32	0,27%	16,71	16,75	0,24%	-37,29	-37,33	0,11%
7	-226,40	-225,03	0,61%	44,42	44,57	0,34%	-57,2	-57,33	0,23%
8	180,39	180,04	0,19%	42,41	42,56	0,35%	-56,2	-56,32	0,21%
9	-6,60	-6,57	0,45%	47,56	47,74	0,38%	-61,48	-61,63	0,24%
10	85,56	85,58	0,02%	11,68	11,71	0,26%	-33,45	-33,47	0,06%
11	-68,47	-68,24	0,34%	18,67	18,74	0,37%	-32,25	-32,29	0,12%
12	-119,86	-118,92	0,78%	31,5	31,58	0,25%	-43,55	-43,63	0,18%
13	84,90	84,73	0,20%	31,43	31,52	0,29%	-43,45	-43,53	0,18%
14	-3,72	-3,69	0,81%	37,47	37,58	0,29%	-49,77	-49,88	0,22%
15	25,82	26,01	0,74%	15,61	15,69	0,51%	-28,51	-28,55	0,14%
16	-38,89	-38,72	0,44%	12	12,04	0,33%	-25,99	-26,01	0,08%
17	-50,12	-49,57	1,10%	20,3	20,36	0,30%	-32,12	-32,15	0,09%
18	26,38	26,33	0,19%	20,36	20,43	0,34%	-32,37	-32,42	0,15%
19	-1,82	-1,81	0,55%	26,66	26,76	0,38%	-38,14	-38,22	0,21%
20	10,27	10,37	0,97%	8,3	8,34	0,48%	-22,81	-22,84	0,13%
21	-16,14	-16,04	0,62%	5,92	5,96	0,68%	-19,8	-19,82	0,10%
22	-10,91	-10,83	0,73%	8,11	8,13	0,25%	-18,8	-18,81	0,05%
23	-0,86	-0,85	0,66%	8,71	8,74	0,34%	-19,73	-19,76	0,15%
24	-0,85	-0,85	0,09%	15,9	15,97	0,44%	-29,69	-29,76	0,24%
25	5,95	5,97	0,34%	1,17	1,19	1,71%	-12,56	-12,57	0,08%
26	-0,23	-0,23	0,97%	71,59	71,74	0,21%	-66,15	-66,33	0,27%
27	-75,56	-75,49	0,09%	52,2	52,30	0,19%	-51,16	-51,27	0,22%
28	-54,95	-54,97	0,04%	64,6	64,75	0,23%	-62,97	-63,13	0,25%
29	-47,26	-47,25	0,02%	62,9	63,05	0,24%	-67,75	-67,90	0,22%
30	-0,77	-0,76	1,30%	55,96	56,07	0,20%	-53,22	-53,35	0,24%
31	-56,28	-56,18	0,18%	35,48	35,55	0,20%	-33,92	-34,00	0,24%
32	-44,30	-44,29	0,02%	53,71	53,84	0,24%	-52,03	-52,19	0,31%
33	-49,75	-49,76	0,02%	46,92	47,02	0,21%	-49,06	-49,16	0,20%
34	-3,23	-3,24	0,31%	44,25	44,34	0,20%	-42,04	-42,14	0,24%
35	-42,25	-42,17	0,19%	21,81	21,85	0,18%	-20,48	-20,52	0,20%
36	-41,14	-41,51	0,90%	43,34	43,44	0,23%	-41,56	-41,69	0,31%
37	-46,75	-46,74	0,02%	34,88	34,95	0,20%	-36,82	-36,89	0,19%
38	-3,07	-3,07	0,00%	31,91	31,97	0,19%	-30,45	-30,59	0,46%
39	-29,50	-29,45	0,17%	9,76	9,76	0,00%	-8,52	-8,53	0,12%
40	-40,85	-40,85	0,00%	32,56	32,63	0,21%	-30,96	-31,06	0,32%
41	-45,65	-45,65	0,00%	23,08	23,13	0,22%	-23,98	-24,03	0,21%
42	-6,43	-6,44	0,16%	19,8	19,82	0,10%	-19,43	-19,47	0,21%
43	-20,58	-20,56	0,10%	1,67	1,68	0,60%	-0,63	-0,64	1,59%
44	-35,17	-35,13	0,11%	21,4	21,44	0,19%	-18,85	-18,91	0,32%
45	-46,57	-46,56	0,02%	10,84	10,85	0,09%	-12,56	-12,57	0,08%
46	205,11	205,16	0,02%	0	0	-	0	0	-
47	-208,71	-208,50	0,10%	0	0	-	0	0	-
48	121,82	121,74	0,07%	0	0	-	0	0	-
49	-122,43	-122,12	0,25%	0	0	-	0	0	-
50	83,10	83,07	0,04%	0	0	-	0	0	-
51	-83,92	-83,69	0,27%	0	0	-	0	0	-
52	49,49	49,97	0,97%	0	0	-	0	0	-
53	-50,48	-50,32	0,32%	0	0	-	0	0	-
54	18,42	18,54	0,65%	0	0	-	0	0	-
55	-18,77	-18,63	0,75%	0	0	-	0	0	-

APPENDICE B

Codice completo



SEZIONI E MATERIALE

VINCOLI

DEFINIZIONE NODI SUPPORTI

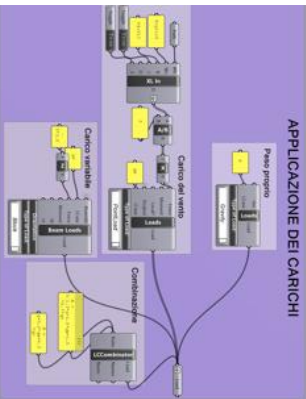


CARICHI

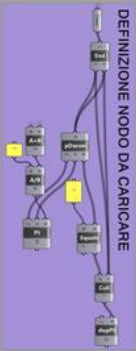
DEFINIZIONE NODO DA CARICARE



APPLICAZIONE DEI CARICHI



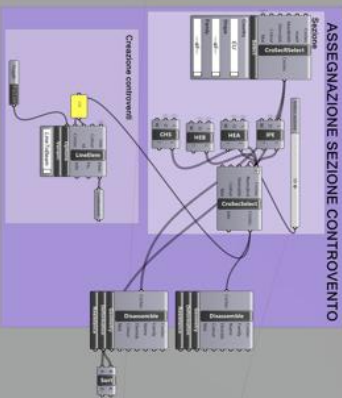
DEFINIZIONE NODO DA CARICARE



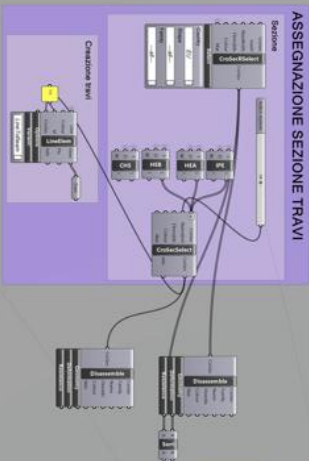
MATERIALE



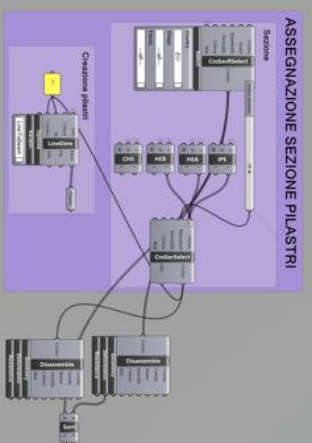
ASSEGNAZIONE SEZIONE CONTROVENTO



ASSEGNAZIONE SEZIONE TRAVI



ASSEGNAZIONE SEZIONE PILASTRI

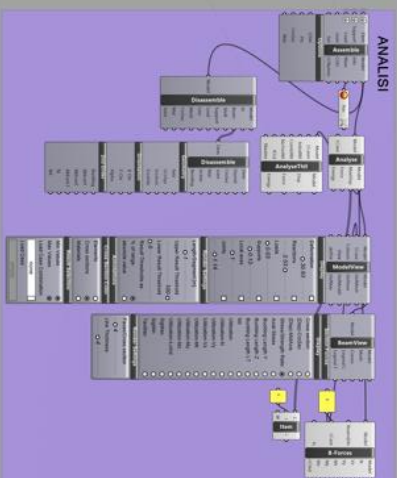


COLLEZIONE ELEMENTI

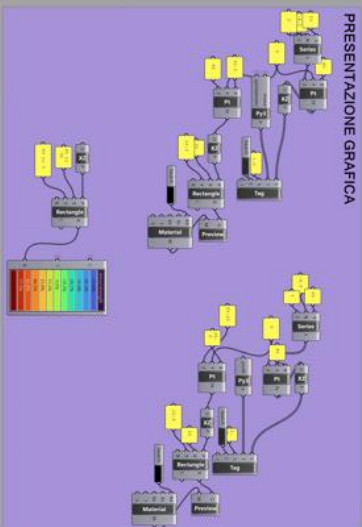


ANALISI

ANALISI

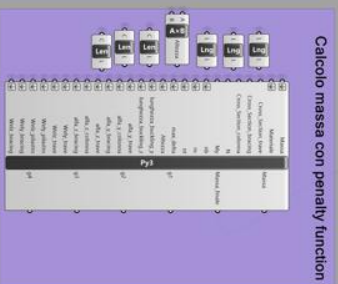


PRESENTAZIONE GRAFICA



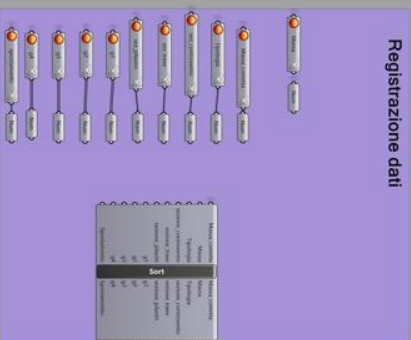
OTTIMIZZAZIONE EVOLUTIVA

Solutore evolutivo



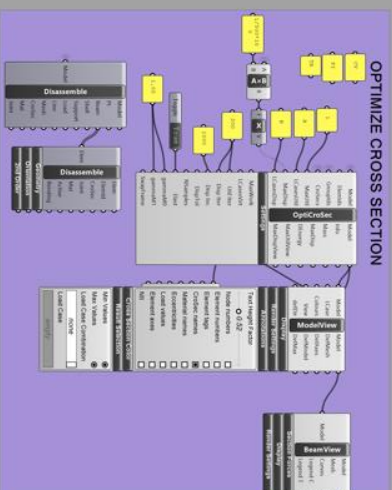
REGISTRAZIONE DATI

Registrazione dati

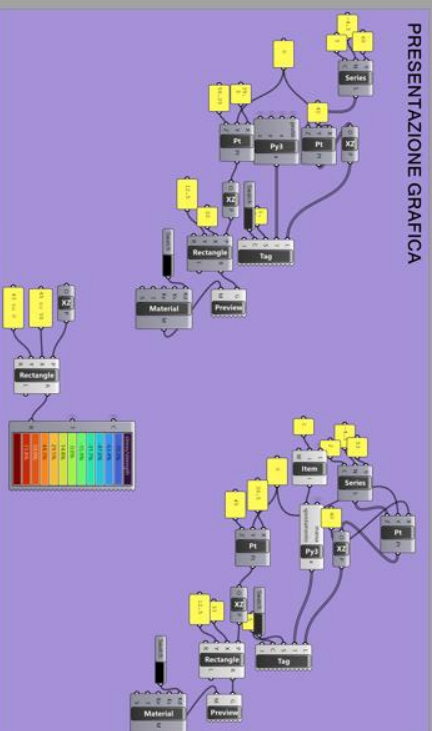


OPTIMIZE CROSS SECTION

OPTIMIZE CROSS SECTION



PRESENTAZIONE GRAFICA



Script Python (penalty function)

```
from math import *
import ghpythonlib.treehelpers as th

##### DEFINIZIONE CARICHI ASTE #####
### Sforzo normale sia in trazione che in compressione
x_lists = th.tree_to_list(N)

N_ed_t = []
N_ed_c = []

#si crea una lista di valori in compressione e una per valori in trazione prendendo il massimo
valore (avendone due) in trazione e il minimo in compressione
for valore in x_lists:
    max_val = max(valore)
    min_val = min(valore)

    # Se il minimo è positivo, lo forziamo a 0
    corrected_min = min_val if min_val <= 0 else 0

    # Se il massimo è negativo, lo forziamo a 0
    corrected_max = max_val if max_val >= 0 else 0

    N_ed_t.append(corrected_max*1e3) #in N
    N_ed_c.append(corrected_min*1e3) #in N

### Momento y
x_lists = th.tree_to_list(My)

My = []

for valore in x_lists:
    max_val = max(valore, key=abs)
    My.append(max_val*1e6) #in Nmm

#-----#
##### PROPRIETA' GEOMETRICHE #####
### Definizione area in mm2
Area_trave = Cross_Section_trave.A
Area_colonna = Cross_Section_colonna.A
Area_bracing = Cross_Section_bracing.A
Area = [Area_bracing for i in range(nb)]+[Area_trave for i in range(nt)]+[Area_colonna for i in
range(nc)]

### Definizione Jy,Wy,Jz,Wz (in mm3,in mm4)
Jy_colonna = Cross_Section_colonna.Iyy
Jy_trave = Cross_Section_trave.Iyy
Jy_bracing = Cross_Section_bracing.Iyy
Jy = [Jy_bracing for i in range(nb)]+[Jy_trave for i in range(nt)]+[Jy_colonna for i in
range(nc)]

Jz_colonna = Cross_Section_colonna.Izz
Jz_trave = Cross_Section_trave.Izz
Jz_bracing = Cross_Section_bracing.Izz
Jz = [Jz_bracing for i in range(nb)]+[Jz_trave for i in range(nt)]+[Jz_colonna for i in
range(nc)]
```

```

Wy = [Wely_bracing for i in range(nb)]+[Wely_trave for i in range(nt)]+[Wely_pilastro for i in
range(nc)]
Wz = [Welz_bracing for i in range(nb)]+[Welz_trave for i in range(nt)]+[Welz_pilastro for i in
range(nc)]

Area = [Area[i] * 1000000 for i in range(len(Area))] #in mm2
Jy = [Jy[i] * 1e12 for i in range(len(Jy))] #in mm2
Jz = [Jz[i] * 1e12 for i in range(len(Jz))] #in mm2
Wy = [Wy[i] * 1e3 for i in range(len(Wy))] #in mm2
Wz = [Wz[i] * 1e3 for i in range(len(Wz))] #in mm2

#-----#
## PROPRIETA' MATERIALE
# Material properties
fyk = 355 #N/mm^2 = MPa
gamma_M0, gamma_M1 = 1.05, 1.05
E_modulus = 210000 #MPa

#-----#

## DEFINIZIONE FUNZIONE OBIETTIVO ##
# Definizione volume [m^3]
densità = 7850 #kg/m^3
Volume = Massa/densità
#-----#

## DEFINIZIONE VINCOLI ##
# Verifica 1: trazione (tutti gli elementi)
N_Rd_t = [(i * fyk/gamma_M0) for i in Area]
g1 = sum( list(map(max, [N_ed_t[ii]/N_Rd_t[ii] - 1 for ii in range(len(N_ed_t))], [(0) for i in
range(len(N_ed_t))])) ) ##### g1

# Verifica 2 : compressione (tutti elementi: controventi - CHS; travi e colonne - IPE)
Ncr_y= [pi**2 * E_modulus * Jy[i]/ (lunghezza_buckling_y[i]*1000)**2 for i in
range(nb+nc+nt)] # carico critico euleriano
nondim_slenderness_y = [sqrt( fyk * Area[ii] / Ncr_y[ii]) for ii in range(nb+nc+nt)]
Ncr_z= [pi**2 * E_modulus * Jz[i]/ (lunghezza_buckling_z[i]*1000)**2 for i in range(nb+nc+nt)]
nondim_slenderness_z = [sqrt( fyk * Area[ii] / Ncr_z[ii]) for ii in range(nb+nc+nt)]

alfa_y = [alfa_y_bracing for i in range(nb)]+[alfa_y_trave for i in
range(nt)]+[alfa_y_colonna for i in range(nc)]
alfa_z = [alfa_z_bracing for i in range(nb)]+[alfa_z_trave for i in
range(nt)]+[alfa_z_colonna for i in range(nc)]

phi_y = [( 1 + alfa_y[ii] * (nondim_slenderness_y[ii] - 0.2) + nondim_slenderness_y[ii]**2 ) / 2
for ii in range(nc+nb+nt)]
chi_y = [1 / (phi_y[ii] + sqrt(phi_y[ii]**2 - nondim_slenderness_y[ii]**2) ) for ii in
range(nc+nb+nt)] # reduction factor
N_Rd_b_y = [chi_y[ii] * Area[ii]*fyk/gamma_M1 for ii in range(nb+nc+nt)]
phi_z = [( 1 + alfa_z[ii] * (nondim_slenderness_z[ii] - 0.2) + nondim_slenderness_z[ii]**2 ) / 2
for ii in range(nc+nb+nt)]
chi_z = [1 / (phi_z[ii] + sqrt(phi_z[ii]**2 - nondim_slenderness_z[ii]**2) ) for ii in
range(nc+nb+nt)] # reduction factor
N_Rd_b_z = [chi_z[ii] * Area[ii]*fyk/gamma_M1 for ii in range(nb+nc+nt)]
N_Rd_b = min(N_Rd_b_z,N_Rd_b_y)

```



```

g2 = sum( list(map(max, [-N_ed_c[ii]/N_Rd_b[ii] - 1 for ii in range(len(N_ed_c))], [(0) for i in
range(len(N_ed_c))])) ) ##### g2

# Verifica 3 (linear interaction)
My_Rd_b = [Wy[i]*(fyk/gamma_M0) for i in range(len(Wy))]

g3 = sum(list(map(max, [(abs(N_ed_c[ii]/N_Rd_b[ii])+abs(My[ii]/My_Rd_b[ii]))-1 for ii in
range(len(My))], [(0) for i in range(len(N_ed_t))])) ) #####g3
# Verifica 4 : spostamento massimo

g4 = max( (max_delta/100) /(1/500 * Altezza) -1
,0) ##### g4

# PENALTY OBJ FUN
k = 100
penalty = g1 + g2 + g3 +g4
Massa_finale = Massa * ( 1 + k * penalty )

```

Script Python (posizionamento controventi)

```

import ghpythonlib.treehelpers as th

num_moduli = int(moduli_x) * int(moduli_z)
campate_attive = activation_genes[0:num_moduli]

try:
    activation_bools = [bool(int(gene)) for gene in campate_attive]
except (ValueError, TypeError):
    activation_bools = [False] * (len(campate_attive) if campate_attive else 0)

raw_modules_lines = th.tree_to_list(current_bracing_data)

if len(raw_modules_lines) == 1 and isinstance(raw_modules_lines[0], list):
    linee_modulo = raw_modules_lines[0]
else:
    linee_modulo = raw_modules_lines

linee_modulo = 0
if len(linee_modulo) > 0 and isinstance(linee_modulo[0], list):
    lines_per_module = len(linee_modulo[0])

a_1 = []
if lines_per_module > 0:
    if len(activation_bools) == num_moduli:
        for module_idx in range(num_moduli):
            module_active_status = activation_bools[module_idx]
            a_1.extend([module_active_status] * linee_modulo)
    else:
        a_1 = [True] * (num_moduli * linee_modulo)
else:
    a_1 = [False] * (num_moduli * 2)

a=a_1

```

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Articoli e libri

1. Ali, M., Zaker, M., & Anwar, S. F. (2018). Effect of wind load on low, medium, high rise buildings in different terrain category. *International Journal of Management, Technology And Engineering*, 8(12).
2. Amadio, C., Bomben, L., & Noè, S. (2022). Design of X-Concetric Braced Steel Frame Systems Using an Equivalent Stiffness in a Modal Elastic Analysis. *Buildings*, 12, 359.
3. Aydogdu, I., Ormecioglu, T. O., Tunca, O., & Carbas, S. (2022). Design of large-scale real-size steel structures using various modified grasshopper optimization algorithms. *Neural Comput Appl*, 34.
4. Bazant, Z. P., & Cedolin, L. (2010). *STABILITY OF STRUCTURES: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*.
5. Carpinteri, A. (1992). *Scienze delle Costruzioni* (Vol. 2).
6. Changizi, N., & Jalalpour, M. (2017). Robust topology optimization of frame structures under geometric or material properties uncertainties. *Struct Multidiscip Optimiz*, 56.
7. Cui, C.-Y., & Jiang, B.-S. (2014). A morphogenesis method for shape optimization of framed structures subject to spatial constraints. *Eng Struct*, 77.
8. Deb, K. (2011). Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An introduction. *COIN Report No. 2011003*.
9. Doran, B. (2003). Elastic-plastic analysis of R/C coupled shear walls: The equivalent stiffness ratio of the tie elements. *Journal of the Indian Institute of Science*.
10. Eisele, J., & Kloft, E. (2003). High-Rise Manual: Typology and Design, Construction and Technology (pp. 11–23).
11. Eisele, J., & Kloft, E. (2003). High-Rise Manual: Typology and Design, Construction and Technology (pp. 77–95).
12. Fu, F. (2018). Tube System in Tall Building. In *Design and Analysis of Tall and Complex Structures*.
13. Gao, X., & Ma, H. (2015). Topology optimization of continuum structures under buckling constraints. *Comput. Struct.*, 157.
14. Heidari, A. A., Faris, H., Aljarah, I., & at all. (2019). Harris Hawks optimization: Algorithm and application. *Future Generation Computer Systems*.
15. Hossain, M. (2021). Framed Structures.
16. Khatri, A. G., Goud, R., & Awatshi, G. (2019). Performance of tube in tube structure: A review. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials and Structures for Civil Infrastructures (SMSCI2019)*.

17. Kicinger, R., Arciszewski, T., & De Jong, K. A. (2005). Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art. *Computers & Structures*, 83.
18. Kociecki, M., & Adeli, H. (2015). Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing. *Eng Appl Artif Intell*, 38.
19. Kushwaha, N., Binnani, N., Rode, V. R., & Azhar, S. (2021). Comparative Study of Different Bracing System in Seismic zone 3 and 4.
20. Manguri, A., Hassan, H., Saeed, N., & Jankowski, R. (2025). Topology, Size and Shape Optimization in Civil Engineering Structures: A review. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 142.
21. Mashayekhi, M., & Mosayyebi, S. (2023). A new hybrid Harris Hawks optimization (HHO) and particle swarm optimization (PSO) algorithm for the design of castellated beams. *Asian J Civil Eng*, 24.
22. Mazzolani, M., Ballio, G., Bernuzzi, C., & Landolfo, R. (2020). *Strutture in acciaio, Teoria e progetto*.
23. Mendis, P., Ngo, T. D., & Haritos, N. (2007). Wind Loading on Tall Buildings. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7.
24. Ministry of Housing, Communities & Local Government. (2021). *Guidance notes for design codes*.
25. Moon, K. S. (2016). Diagrid Systems for Structural Design of Complex-Shaped Tall Buildings. *Internations Journal of High-Rise Buildings*, 5.
26. Rothwell, A. (2017). *Optimization Methods in Structural Design*.
27. Samat, R. A., Khairudin, M. F., Din, M. H., & at all. (2019). Comparative Structure Performance of Diagrid and Bracing System in Mitigation of Lateral Displacement. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 220.
28. Sotiropoulos, S., & Lagaros, N. (2021). A two-stage structural optimization-base design procedure of structural systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.
29. Shimoda, M., Nagano, T., & Shi, J.-X. (2019). Non-parametric shape optimization method for robust design of solid, shell, and frame structures considering loading uncertainty. *Struct Multidiscip Optimiz*, 59.
30. Smith, R. (2011). Deflection limits in tall buildings – Are they useful, *Conference paper*.
31. Su, R., Tangaramvong, S., Van, T. H., & at all. (2023). Binary comprehensive learning particle swarm optimization approach for optimal design of nonlinear steel structure with standard sizes. *Buildings*, 13.
32. Tait, T. (2024, April 12). *Galapagos in Grasshopper: Step-by-Step Guide to the Evolutionary Solver*. Hopific.

33. Woodbury, R., Mohiuddin, A., Cichy, M., & Mueller, V. (2017). Interactive design galleries: A general approach to interacting with design alternatives. *Design Studies*, 52.
34. Yamada, S., & Kanno, Y. (2016). Relaxation approach to topology optimization of frame structure under frequency constraint. *Struct Multidiscip Optimiz*, 53.

Normativa

35. ASCE/SEI 7-22.
36. CNR-DT 207 R1/2018.
37. Circolare Esplicativa (NTC2018). (2019, 21 gennaio).
38. Eurocodice 3 (UNI EN 1993-1-1:2022).
39. NTC2018, cap. 3. (2018, 17 gennaio).
40. NTC2018, cap. 4. (2018, 17 gennaio).

Sitografia

41. Aurecon Group. *The evolution of tall buildings: Past and present trends*.
<https://www.aurecongroup.com/insights/tall-buildings-past-and-present-trends>.
42. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. *Tall Building Criteria*.
<https://www.ctbuh.org/resource/height>.
43. Historic England. (2015). *Tall Buildings Advice Note 4*.
<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/tall-buildings-advice-note-4/heag037-tall-buildings-v2/>.
44. Ingenio-web (2019, 26 giugno). *Progettare un grattacielo oggi: un focus sull'evoluzione tecnologica e morfologica dell'edificio a torre*.
<https://www.ingenio-web.it/articoli/progettare-un-grattacielo-oggi-un-focus-sull-evoluzione-tecnologica-e-morfologica-dell-edificio-a-torre>.
45. Karamba3D – Home page.
<https://karamba3d.com/>.
46. McNeel Discourse. *Optimisation using Galapagos*.
<https://discourse.mcneel.com/t/optimisation-using-galapagos/63937/3>.
47. Parametric House. *Galapagos*.
<https://parametrichouse.com/parametric/galapagos/>.
48. RhinoceroShop. *Galapagos – Evolutionary Solver per Grasshopper*.
<https://www.rhinoceroshop.it/galapagos-evolutionary-solver-per-grasshopper/>.
49. Tait, T. (2024, 12 aprile). *Galapagos in Grasshopper: Step-by-Step Guide to the Evolutionary Solver*.
<https://hopific.com/galapagos-grasshopper-tutorial/>.
50. The Constructor. *Outriggers for High-Rise Buildings*.

- <https://theconstructor.org/structural-engg/outriggers-high-rise-building/247964/>.
51. 3Dnatives. (2023, 14 novembre). *Guida: Software Grasshopper per la Produzione Additiva*.
<https://www.3dnatives.com/it/guida-software-grasshopper-produzione-additiva-141120239/#>.
52. *Grasshopper 3D. Evolutionary Principles*.
<https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.
53. YouTube. (2018, 18 agosto). *Grasshopper Galapagos Tutorial*.
<https://www.youtube.com/watch?v=g3CPe1bPhEw>.
54. Dannati Architetti. (2024, 21 giugno). *Storia dei grattacieli - Speciale Tall Buildings*.
<https://www.youtube.com/watch?v=nn6bSdy3brk>.