Facoltà di Ingegneria dell'università di Roma Tre

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile per la protezione dai rischi naturali

Relazione di fine tirocinio

Modellazione strutturale delle coperture del complesso di S.Bernardino: modellazione e verifiche.

Tutor *Studente*

Prof. Gianmarco de Felice Alessia Diletti

Sommario

1.Introduzione 3

2.Breve descrizione del Complesso di S.Bernardino 4

2.1Modellazione 6

2.2Fasi dell'analisi 7

2.2.1Menù contesto 8

2.2.1Contesto introduzione dati 9

2.2.2Definizione dell'archivio delle sezioni 10

2.2.3Contesto assegnazione dei carichi 12

2.2.4Definizione delle combinazioni 15

2.2.5Contesto visualizzazione dei risultati 17

2.2.6Contesto assegnazione dati di progetto 18

3.Conclusioni 23

1.Introduzione

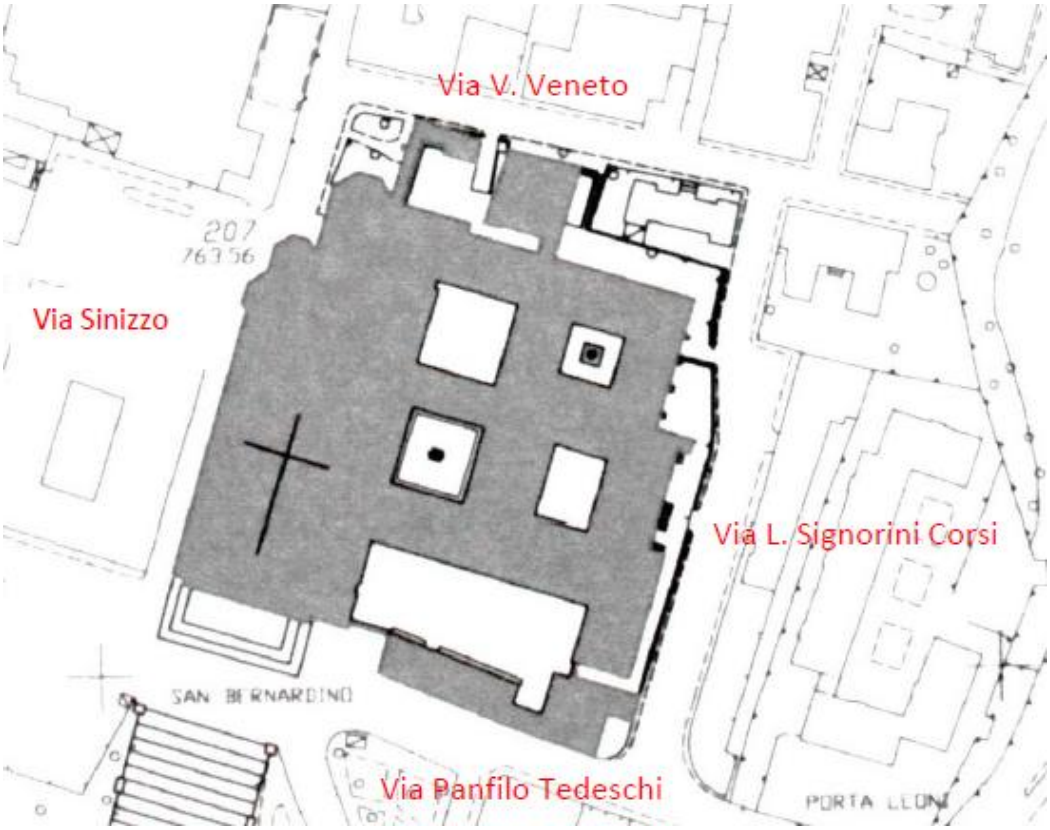
La finalità dell'attività di tirocinio svolta è basata sull'acquisire capacità e padronanza tecnica dei programmi alla base della progettazione edilizia (Autocad) e del calcolo strutturale (PRO-SAP VERS.16.1.0).

L'obiettivo è mirato alla realizzazione e analisi di un modello strutturale che possa simulare il comportamento globale delle coperture lignee, inoltre la struttura è realizzata in muratura;

L'attività di tirocinio svolta prevede:

- la realizzazione di un modello agli elementi finiti delle coperture del Complesso di S.Bernardino, sito in L'Aquila; Tale struttura ha subito danni ingenti dopo il terremoto avvenuto nell' Aprile del 2009;
- le verifiche delle diverse tipologie strutturali presenti tramite software;

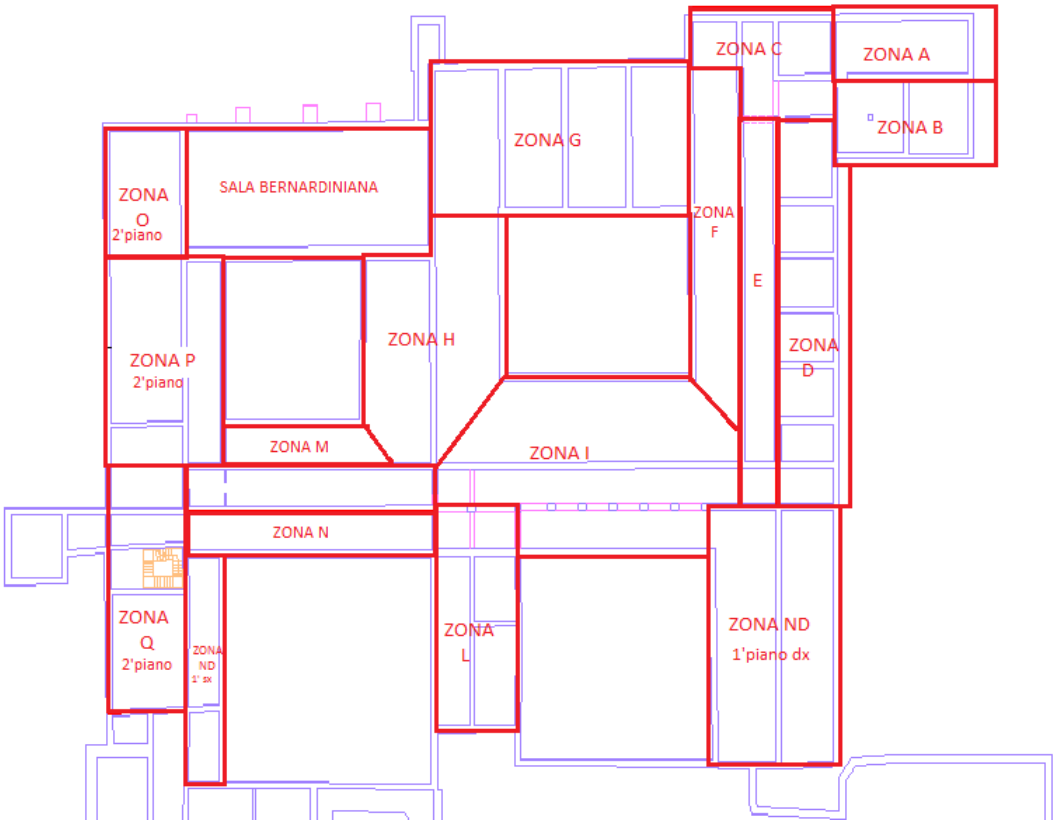
2.Breve descrizione del Complesso di S.Bernardino



L'intero Complesso è attualmente sito tra: Via Sinizzo (Lato Ovest della Basilica), via Vittorio Veneto (Lato Nord, attuale ingresso del convento), via Luigi Signorini Corsi (Lato Est, strutture conventuali e militari che affiancano il lato destro della Basilica), Piazza S. Bernardino, Via Panfilo Tedeschi (Lato Sud, facciata principale della chiesa-ingresso al distretto militare). Il complesso è stato realizzato in fasi differenti ed è stato oggetto di ampliamenti e modifiche in seguito alle mutate esigenze dei frati ma anche a seguito di diversi eventi sismici, incendi e cambiamenti di proprietà. Tale struttura conventuale nel corso della sua lunga vita ha subito demolizioni, ricostruzioni, ristrutturazioni, ampliamenti, sopraelevazioni e restauri soprattutto in seguito al cambiamento di proprietà e di destinazioni d'uso. Nella seconda metà dell'800' infatti buona parte del complesso viene ceduto ai militari. I corpi di fabbrica sono attualmente di proprietà e destinazioni d'uso differenti e nonostante gli adeguamenti e le trasformazioni apportate il complesso presenta una disomogeneità strutturale dovuta alle diverse fasi costruttive delle diverse epoche.

Il rilievo geometrico ha permesso di conoscere le tipologie e le dimensioni degli elementi strutturali che costituiscono le coperture.

La pianta delle coperture lignee del Convento di S.Bernardino in L'Aquila, data la disomogeneità strutturale è stata divisa in diverse zone per ognuna delle quali si è eseguita la modellazione e la corrispondente verifica. Nell'immagine seguente è possibile avere una visione d'insieme delle coperture dell'intero complesso.



Dalla fase di rilievo si sono identificate le diverse zone come:

- Zone F,N ed I2: in tali aree è presente solo il puntone per questo siamo nel caso di una copertura spingente alla quale è necessario un intervento;
- Zone E, P, Q, O: in tali aree siamo in presenza di capriate quindi in questo caso la copertura non è spingente ma necessita lo stesso di interventi di consolidamento;

- Zone H1 ed H2: in tali aree siamo in presenza di mezze capriate quindi anche in questo caso la copertura non è spingente ma necessita lo stesso di interventi di consolidamento;
- Zone I1, L, B, A, M e la zona del seminterrato presentano un sistema di puntone più saetta per questo rientrano nel caso di copertura spingente che necessita di interventi.

Dalla fase di rilievo si è potuto constatare la presenza di una copertura in forte stato di degrado con elementi non ben connessi tra loro e parzialmente smossi durante il terremoto con appoggi ormai ridotti al minimo, inoltre si è in presenza di un tavolato semplice o un tavellonato mal collegato e degradato. La copertura in forte stato di degrado in alcune parti ha subito movimenti in particolare spostamenti di elementi di tipo secondario e principale, che non si trovano più nella sede originaria e ormai presentano appoggi del tutto esigui ed insufficienti. Inoltre si segnala spesso l'assenza di collegamenti, eliminati nel tempo, o la presenza di collegamenti lenti. Le coperture manifestano anche infiltrazioni d'acqua diffuse in numerose e varie zone in planimetria così da ritenere che vi siano generalizzate carenze del sistema di impermeabilizzazione.

2.1Modellazione

L'intera struttura è stata modellata con il metodo agli elementi finiti FEM (Finite Element Method). Il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) è una soluzione matematica a problemi ingegneristici ottenuta discretizzando il problema fisico attraverso NODI ed ELEMENTI.

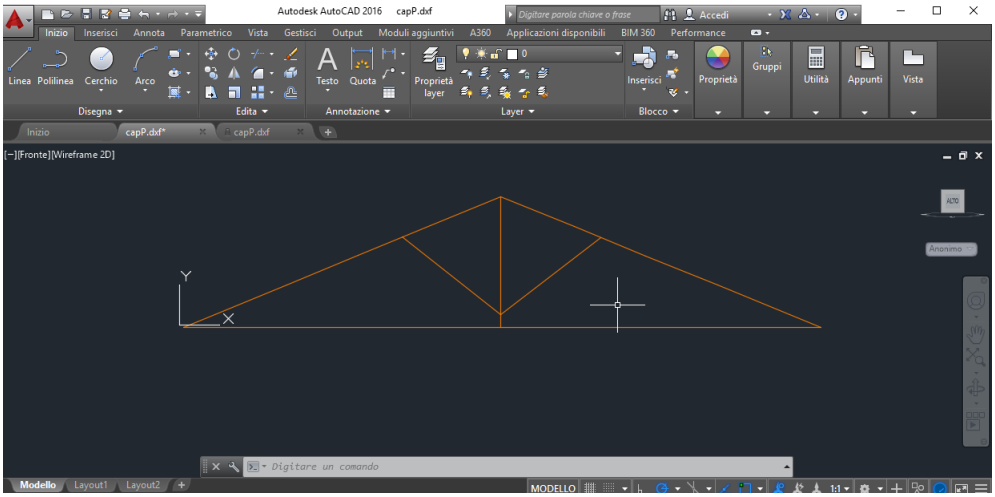
Il metodo degli elementi finiti consente di risolvere il sistema di equazioni differenziali di equilibrio, congruenza e legame costitutivo che governano la statica del continuo deformabile. Studiando l'equilibrio della struttura iperstatica assieme alla sua deformabilità, consente di valutare, oltre allo stato di sollecitazione interna, anche gli spostamenti dei vari punti della struttura.

2.2Fasi dell'analisi

- Definizione dello schema strutturale
- Modellazione
- Controllo dei risultati
- Progettazione degli elementi strutturali

Nella definizione degli schemi strutturali si sono riprodotte le diverse tipologie individuate con il software Autocad, queste sono state semplicemente disegnate cosicchè poi il software PRO_SAP (tramite file dwg) le riconoscesse come aste. Le tipologie disegnate sono:

- Puntone
- Capriate
- Mezze capriate
- Puntone e saetta

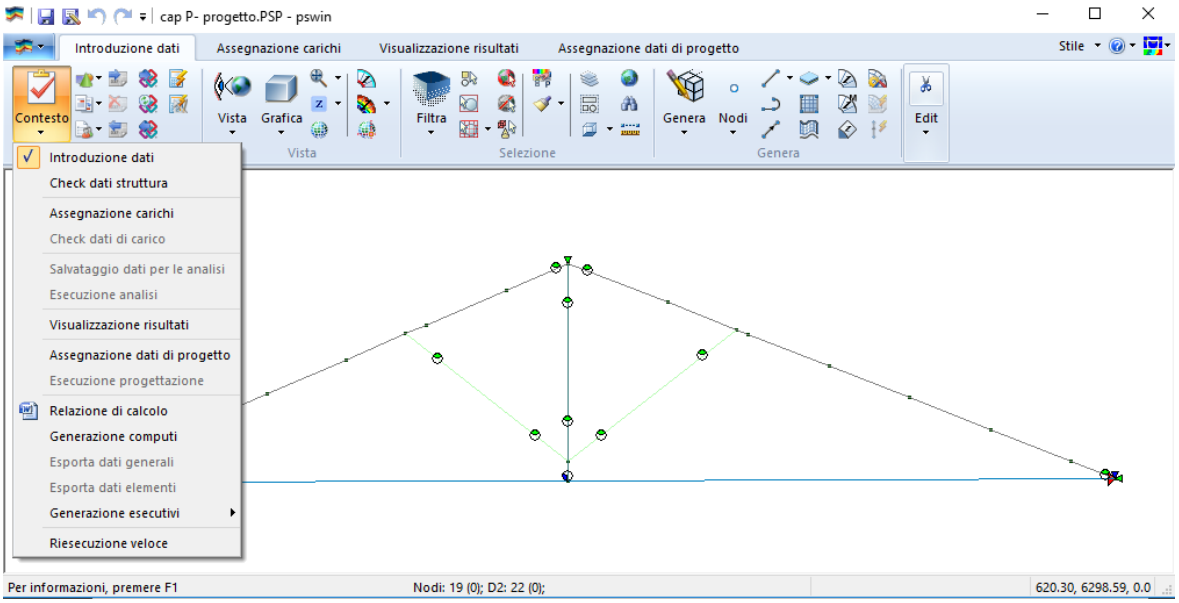


Nella fase di modellazione si è definito lo schema statico della struttura per questo le diverse tipologie sono state schematizzate attraverso delle travature reticolari costituite da elementi elastici (puntoni, saette, tiranti e monaci) semplicemente incernierati alle estremità. La modellazione tramite software PRO_SAP si svolge nei seguenti passi:

2.2.1 Menù contesto

Il menù contesto consente di svolgere le seguenti procedure in cascata, necessarie per il progetto di una struttura:

- Modellazione e controllo automatico
- Assegnazione dei carichi e controllo automatico
- Esecuzione delle analisi
- Visualizzazione dei risultati
- Progettazione degli elementi



Il menù in alto a sinistra reca la scritta **CONTESTO**, ed è il pulsante che consente l'utilizzo del programma nelle sue distinte funzioni: *l'introduzione dati* (disegno della struttura da analizzare o importazione di file in dwg), *l'assegnazione dei carichi* (che ipotizziamo sollecitare la struttura disegnata), e la *visualizzazione dei risultati* dell'analisi statica condotta sulla struttura.

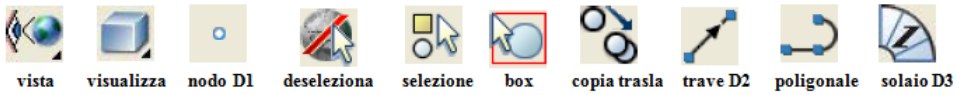
I comandi *check struttura, check carichi, salvataggio per l'analisi ed esecuzione analisi*, effettuano calcoli che servono al calcolatore per procedere, ed introducono ai contesti successivi, i quali diventano

accessibili man mano che si procede nella modellazione, accedendo di fatto a quattro programmi diversi tra loro, inclusi i comandi ed i menù.

2.2.1 Contesto introduzione dati

Il menù riporta i comandi: *genera, dati struttura*, oltre ai permanenti *modifica, visualizza, aiuti, preferenze, ?*. Nei contesti successivi non verranno riportati la barra degli strumenti di disegno (quella con i comandi simili al CAD: ruota, specchia, copia) e le due barre relative alla generazione di nodi,(D1), elementi lineari (D2), elementi piani (D3) ed elementi solidi (D4 – D7..), necessari unicamente in fase di creazione del modello da un punto di vista grafico.

Rimarranno invece le barre della selezione, sebbene cambieranno le opzioni all'interno dei menù (ad esempio solo in contesto immissione dati è possibile ottenere il comando setta: una volta analizzata, la struttura per essere modificata deve retrocedere al contesto immissione, e procedere ad una seconda analisi). In questo contesto i comandi più utili sono:

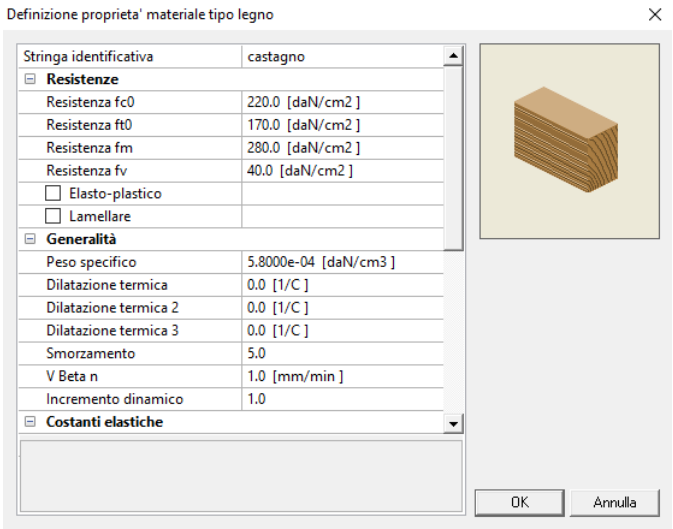


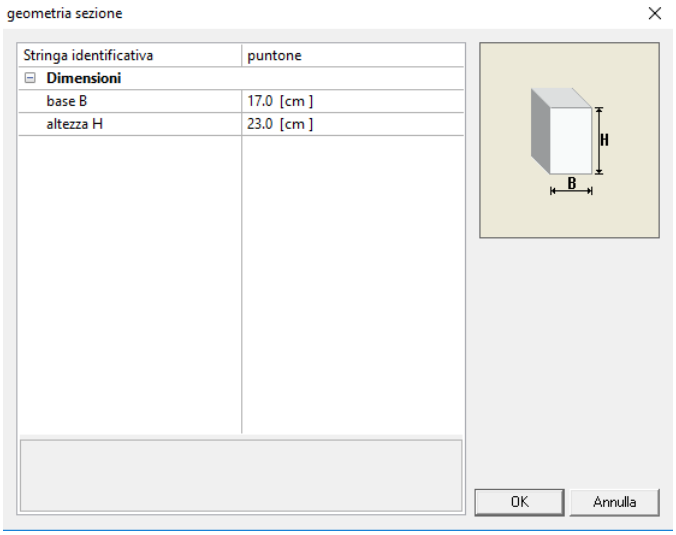
In questa fase non è stato necessario disegnare la struttura ma è stato importato il modello e ad esso sono stati assegnati i nodi e gli elementi. I nodi di estremità sono stati vincolati con un sistema di cerniere e carrelli tali da rappresentare l'effettivo grado di vincolo fornito dall'appoggio delle capriate con il cordolo sommitale della fabbrica. Gli elementi componenti la capriata sono stati modellati come D2, sono state assegnate le diverse sezioni a cui sono state definite le caratteristiche del legno previsto per le coperture che essere il castagno ed il rovere.

2.2.2 Definizione dell'archivio delle sezioni

Nell'archivio delle sezioni è possibile specificare le sezioni che si intendono assegnare agli elementi strutturali. Vi si accede con il comando *Dati struttura* ►*Sezioni.*

Oltre a definire la geometria della sezione è necessario utilizzare il comando *Usa per acciaio/legno* per indicare al programma che la sezione verrà applicata ad elementi con materiale legno.

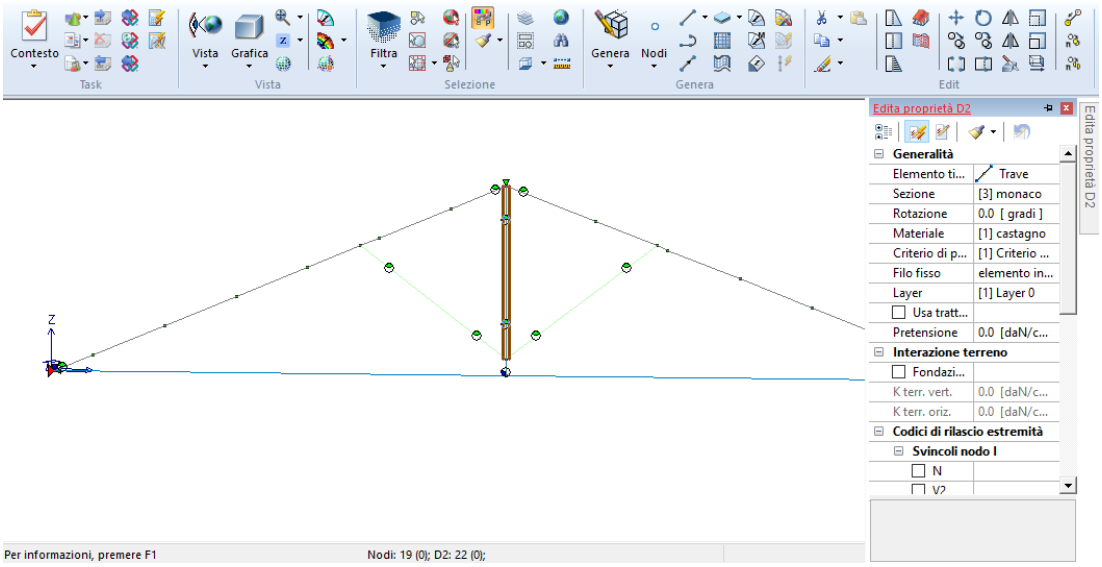




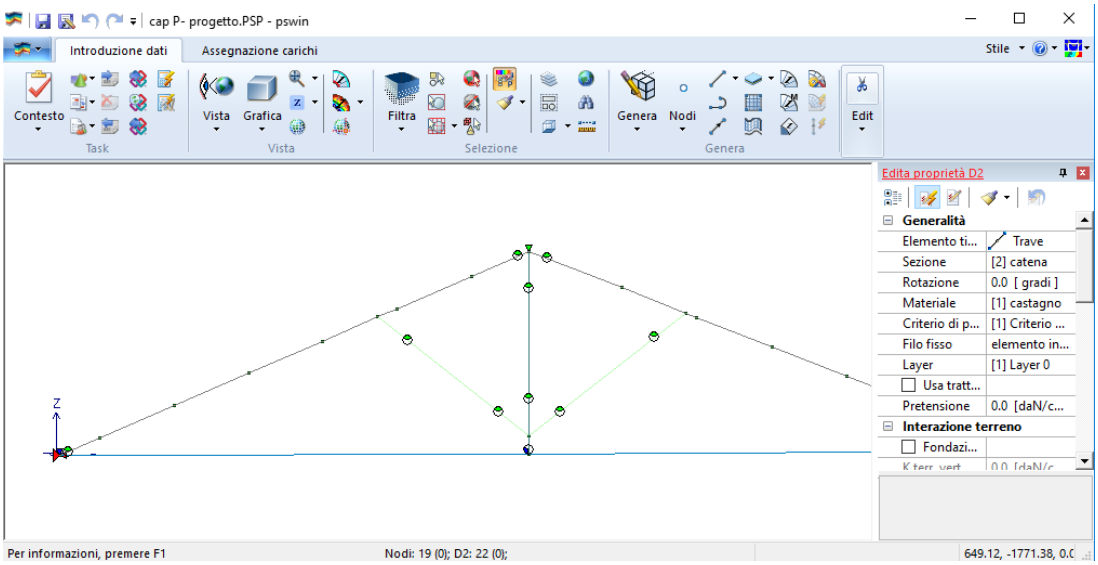
Poiché la struttura in questione è una capriata in legno il monaco non trasmette lo sforzo normale sulla catena. Inoltre si considerano gli arcarecci come forze concentrate sui puntoni. Per simulare entrambe

le situazioni è necessario inserire degli svincoli sugli elementi D2 relativi al monaco ed anche dei nodi sui puntoni in questione. Tali elementi si inseriscono nella tabella delle proprietà degli elementi D2 a cui si accede selezionando il comando *Edita* e cliccando sull'elemento di interesse. È necessario spuntare le sollecitazioni che non si vuole che vengano trasmesse. Sull'elemento, dal lato svincolato apparirà un simbolo ad indicare che alcune sollecitazioni non vengono trasmesse agli elementi collegati.

Per impedire che il monaco trasmetta sforzo normale è necessario impostare le proprietà dell'elemento D2 come da figura seguente:



La struttura ha quindi la seguente forma:



2.2.3 Contesto assegnazione dei carichi

L'apertura del contesto assegnazione carichi *esclude i comandi ed i menù dell'immissione dati*: il menù al posto di *genera e dati struttura* presenta il comando **dati di carico**; anche il menù modifica riporta comandi inerenti il carico, restano gli altri menù.

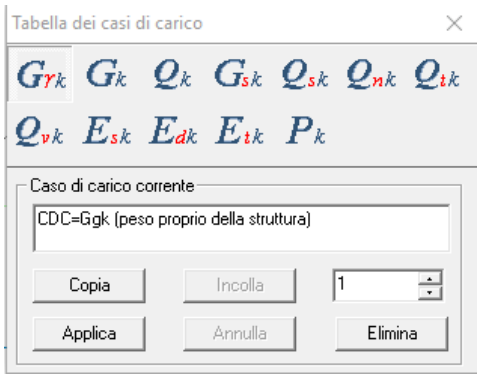
Anche le barre dei comandi sono modificate: nessun comando per elementi, mentre compaiono le selezioni e questi comandi:

i primi due, quelli con gli occhiali, *accendono la visualizzazione dei carichi*, e delle *combinazioni*. Il terzo interroga i carichi di elementi presi singolarmente.

Con le frecce, disponibili previa attivazione del pulsante con gli occhiali, è possibile scorrere osservando i carichi distribuiti imposti alla struttura. Il programma assegna di *default* i **carichi dovuti ai pesi**

propri degli elementi immessi, ed intende i restanti **caricati in modo accidentale.**

Nel Contesto *Assegnazione carichi* è possibile definire ed assegnare i carichi di progetto agli elementi strutturali. PRO_SAP dispone di alcuni automatismi che premettono al programma di definire alcune tipologie di carico senza necessità di intervento da parte dell'utente. I carichi sono organizzati in *Casi di carico*, cioè archivi di carichi di tipologia omogenea, per definirli si usa il comando *Dati di carico* ► *Casi di carico*. Una volta aperto l'archivio dei casi di carico, il programma ha automaticamente definito il caso di carico del peso proprio della struttura a cui è necessario aggiungere, nella posizione numero 2 dell'archivio, un caso di carico tipo *Permanente generico* che servirà a modellare il peso della copertura ed un *Variabile generico* che verrà utilizzato per modellare il carico da neve.



Nell'archivio dei casi di carico sono presenti i seguenti elementi:

Peso proprio della struttura G_{rk}

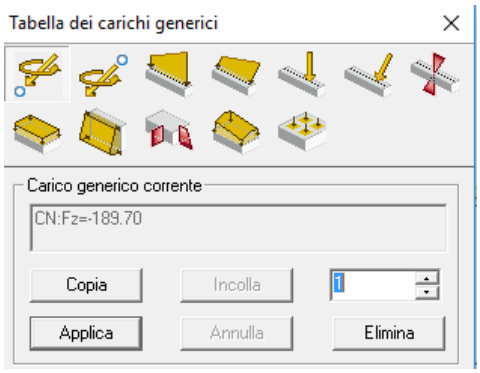
Permanente generico G_k

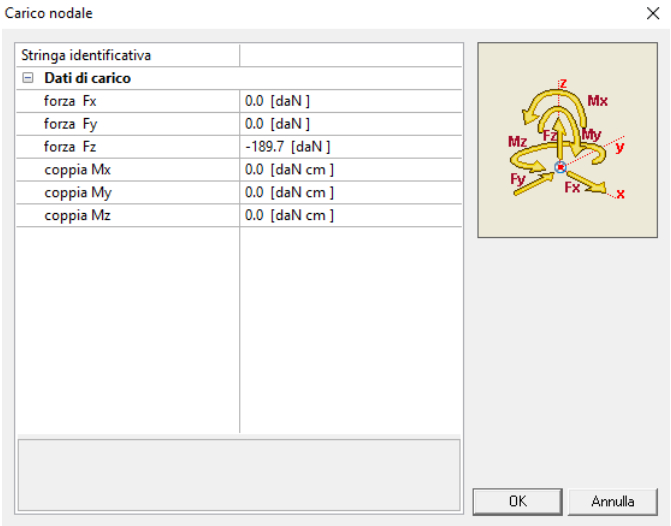
Variabile generico Q_k

Per quanto riguarda il *Peso proprio della struttura* il programma determina automaticamente l'entità del carico in base alle caratteristiche del materiale assegnato agli elementi strutturali; per

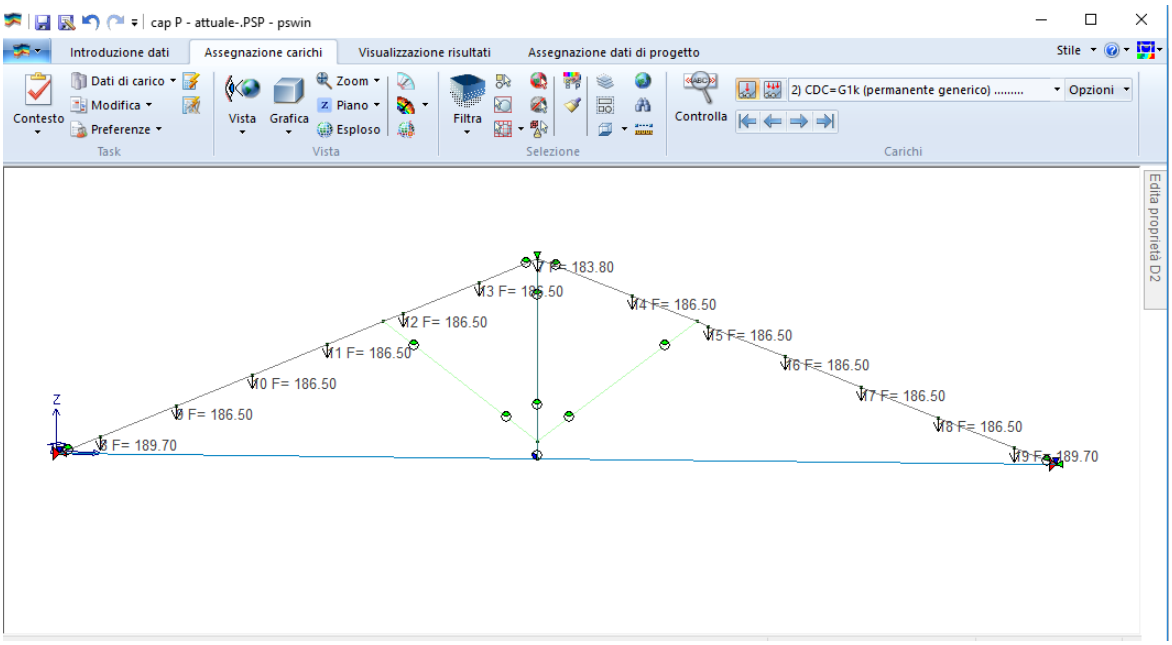
definire l'entità del carico *Permanente generico* e *Variabile generico* è necessario utilizzare il comando *Dati di carico* ►*Carichi generici*.

In questa fase sono stati applicati tre diversi carichi rispettivamente il peso proprio degli arcarecci, il permanente della copertura ed il variabile neve, questi valori sono stati trovati considerando le aree d'influenza di un singolo arcareccio ed applicate ad esso come una forza concentrata nel nodo.

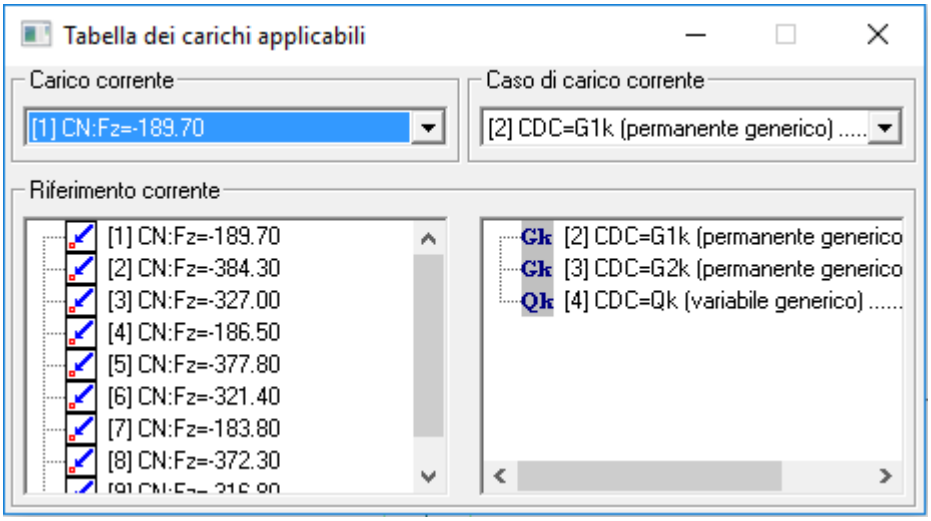




Nella figura seguente si vede il carico generico relativo al peso proprio degli arcarecci.

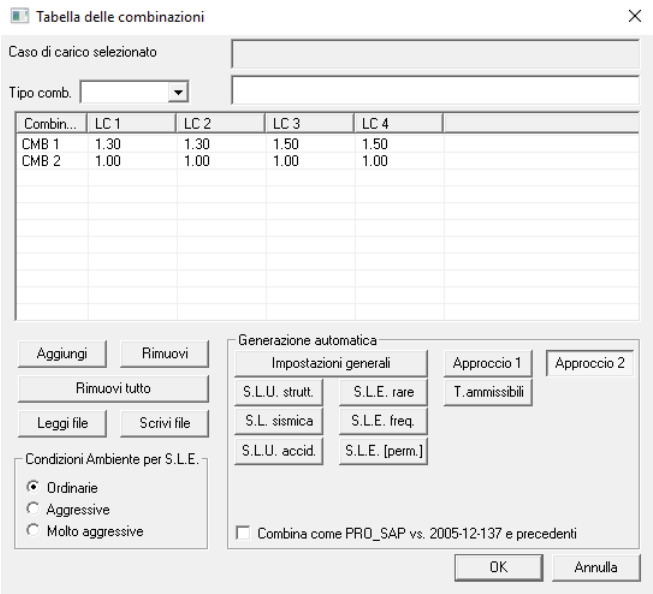


Dopo aver definito i carichi è neccessario applicarli ai nodi per fare questa operazione si utilizza il comando *Edita*



2.2.4Definizione delle combinazioni

Per definire le combinazioni di calcolo si deve utilizzare il comando ***Dati di carico ► Combinazioni***. In questo modo si apre la *Tabella delle combinazioni*.



In questa fase sono stati assegnati alla struttura quattro diversi casi carichi:

- Peso proprio della struttura
- Permanente generico (peso degli arcarecci)
- Permanente generico (peso permanente della copertura)
- Variabile generico (neve)

I carichi permanenti ed il variabile sono stati calcolati tramite le aree di influenza e sono stati assegnati come carichi nodali applicati agli arcarecci.

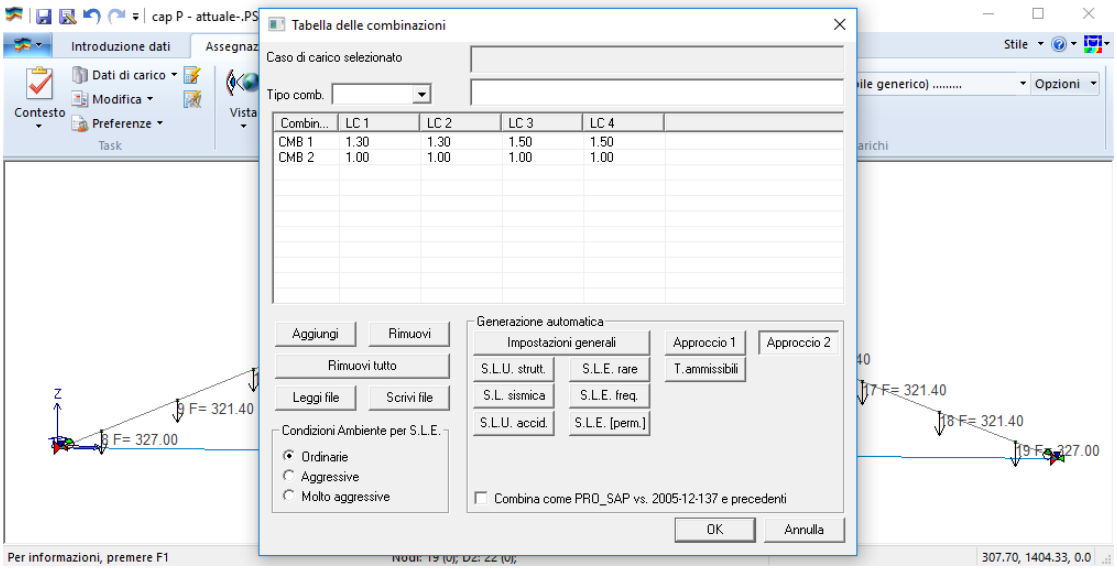
Successivamente sono assegnate due diverse combinazioni:

- Combinazione fondamentale, impiegata per gli stati limite ultimi (SLU) :

$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Qk_1 + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Qk_2 + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Qk_3 + \ldots$ (2.5.1 delle NTC)

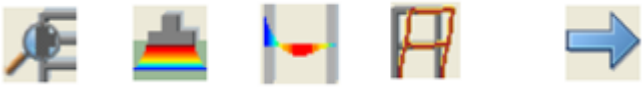
- Combinazione quasi permanente (SLE), impiegata per gli effetti a lungo termine (deformazioni solai e coperture ed altri elementi di nuova costruzione):

$G_1 + G_2 + Q_{k1} + \gamma_{21} \times Q_{k1} + \gamma_{22} \times Q_{k2} + \ldots$ (2.5.4 delle NTC)

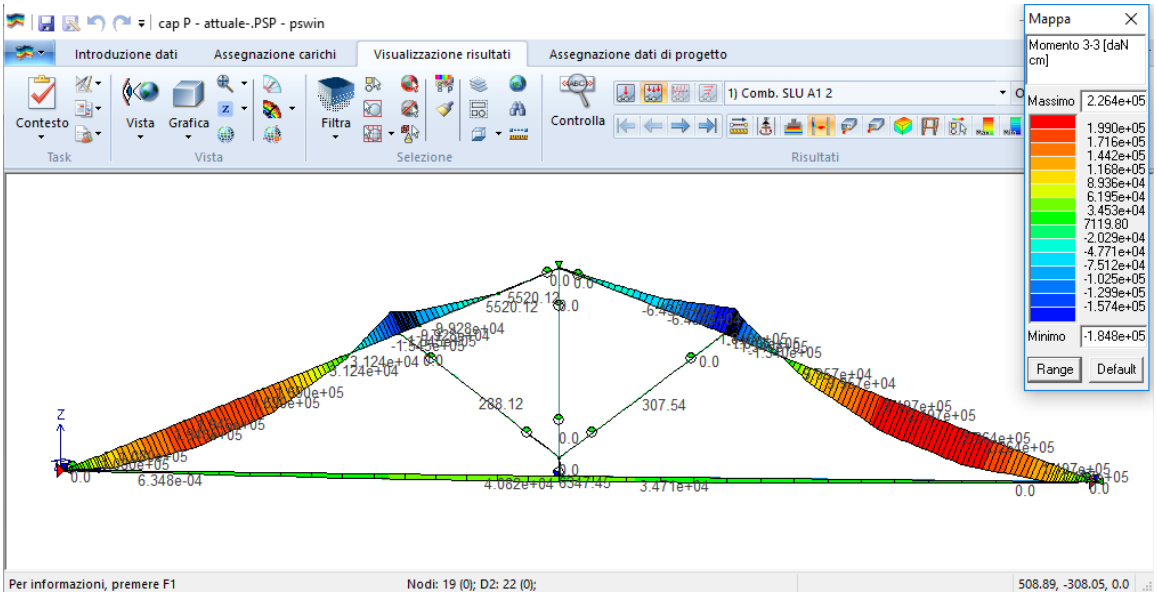


2.2.5Contesto visualizzazione dei risultati

Eseguita l'analisi e premendo il comando diventano accessibili tra gli altri i seguenti comandi:



Tramite l'opzione è possibile visualizzare le azioni sulla struttura, di seguito si riporta l'esempio del diagramma del momento 3-3 agente sulla capriata.

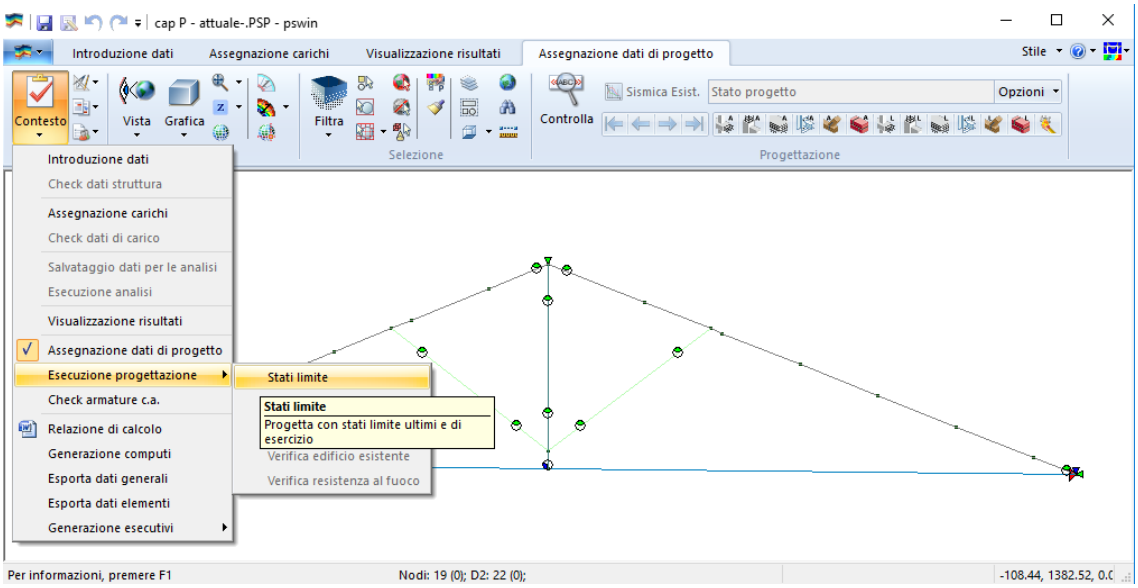


2.2.6Contesto assegnazione dati di progetto

2.2.6.1Esecuzione della progettazione

Una volta definiti i criteri di progetto si può eseguire il progetto e la verifica degli elementi. Bisogna selezionare gli elementi che si intende progettare oppure, se si desidera progettare l'intera struttura, usare il comando *Seleziona tutto*. La progettazione si avvia con il comando ***Contesto ► Esecuzione progettazione ► Stati Limite.***

Successivamente alla visualizzazione dei risultati si apre il contesto di assegnazione dei dati di progetto grazie al quale è possibile eseguire il controllo della progettazione e verifica degli elementi in legno effettuata con il metodo degli Stati limite in ottemperanza alle NTC08.



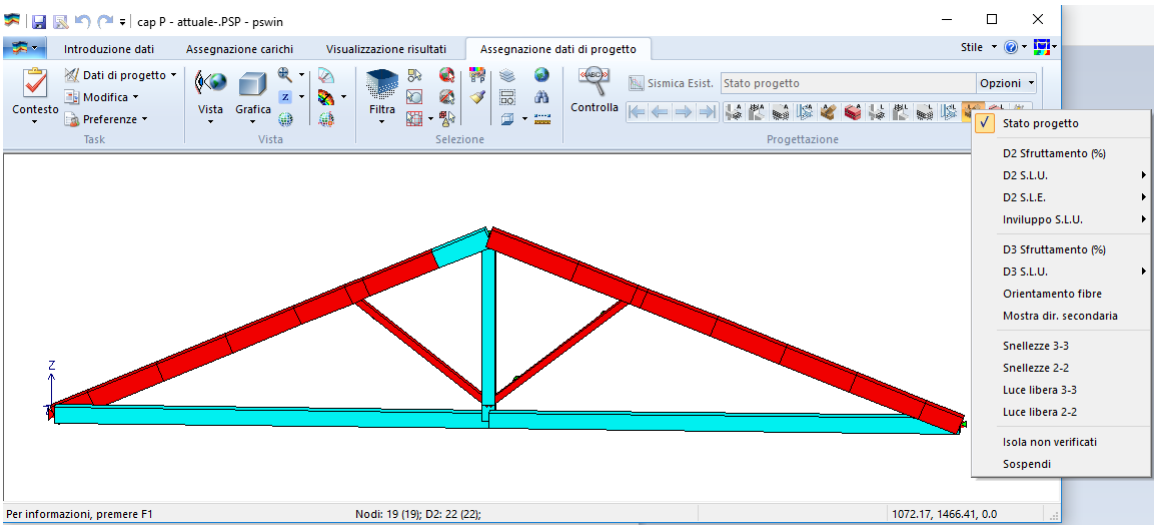
In questa fase deve essere selezionata tutta la struttura in modo che il programma possa eseguire l'analisi agli stati limite in tutti gli elementi di essa, eseguita l'analisi tramite il comando legno EC5 è possibile accedere al menù dei seguenti comandi di controllo:

- **Stato di progetto**, permette la valutazione complessiva dello stato di verifica mediante colorazione, nel seguente modo:
- Colore giallo elementi non progettati

- Colore ciano elementi progettati e verificati
- Colore rosso elementi progettati e non verificati;
- **D2 sfruttamento (%)**, permette la visualizzazione, mediante mappa di colore, dei valori di sfruttamento degli elementi D2 espressi in percentuale;
- **D2 S.L.U**
- Verifica N+/M tensoflessione
- Verifica N-/M pressoflessione
- Verifica V/T taglio e torsione
- Stabilità
- Svergolamento
- **D2 S.L.E.**
- Def.ini.R (1000/L) deformazione massima iniziale in combinazione rara
- Def.ini.F (1000/L) deformazione massima iniziale in combinazione frequente
- Def.ini.P (1000/L) deformazione massima iniziale in combinazione quasi permanente
- Def.fin.R (1000/L) deformazione massima finale in combinazione rara
- Def.fin.F (1000/L) deformazione massima finale in combinazione frequente
- Def.fin.P (1000/L) deformazione massima finale in combinazione quasi permanente

- **Inviluppo SLU**, permette la visualizzazione dell'inviluppo delle sollecitazioni con cui viene realizzata la progettazione degli elementi D2. Si possono visualizzare i diagrammi di inviluppo delle seguenti sollecitazioni:
- Sforzo normale
- Taglio 2
- Taglio3
- Momento torcente
- Momento 2-2
- Momento 3-3

Nella figura che segue si riporta un esempio dello stato di progetto di una capriata allo stato attuale, questa come si vede dal colore rosso risulta essere non verificata infatti sia i puntoni che le saette risultano essere sottodimensionate.



In tale contesto inoltre è possibile anche effettuare la visualizzazione dei risultati relativi ad un singolo elemento tramite il comando

Controlla viene visualizzata la Finestra di controllo generale, che permette di effettuare il controllo dei risultati della progettazione, relativi al singolo elemento.

Per la visualizzazione delle informazioni è necessario, una volta attivato il comando, fare clic con il mouse sull'elemento che si desidera controllare; nella Finestra di controllo generale sono riportati tutti i risultati della progettazione relativi all'elemento in esame.

Per gli elementi D2 in legno sono riportati:

- **Stato di progetto e verifica** Riporta per le verifiche effettuate: Tenso-flessione, Presso-flessione, Taglio-torsione, Stabilità, Flesso-torsione; i codici relativi (OK Verifica, Nv non verifica, non richiesta);
- **Tensioni normali (trazione)** Riporta: o il valore del coefficiente di verifica per tenso-flessione (formula 6.17, EC5) e, tra parentesi, le tre componenti della formula 6.17;
- il valore del coefficiente di verifica per tenso-flessione (formula 6.18, EC5) e, tra parentesi, le tre componenti della formula 6.18;

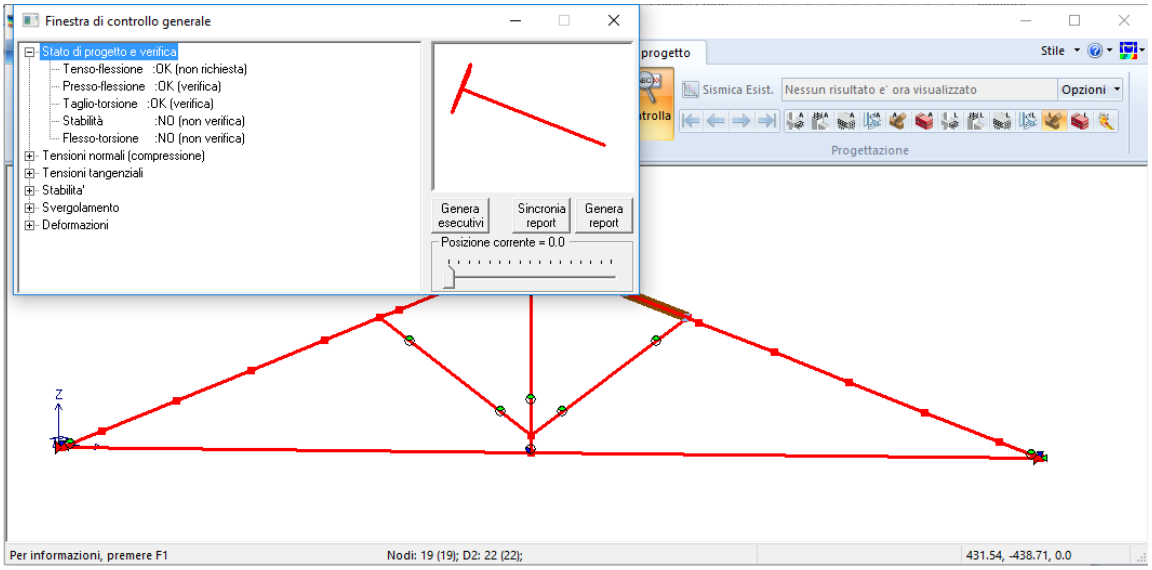
- la combinazione in cui si effettua la verifica e le sollecitazioni corrispondenti;
- il coefficiente k_m (paragrafo 6.1.6, EC5);

- **Tensioni normali (compressione)** Riporta: o il valore del coefficiente di verifica per presso-flessione (formula 6.19, EC5) e, tra parentesi, le tre componenti della formula 6.19;
- il valore del coefficiente di verifica per tenso-flessione (formula 6.20, EC5) e, tra parentesi, le tre componenti della formula 6.20;
- la combinazione in cui si effettua la verifica e le sollecitazioni corrispondenti;
- il coefficiente km (paragrafo 6.1.6, EC5);

- **Tensioni tangenziali** Riporta:
- il valore del coefficiente di verifica per taglio e torsione ottenuto per quadratura dei coefficienti di verifica per taglio e torsione secondo la formula $\frac{\tau_{tor,d}}{k_{sh} f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_d}{f_{v,d}}\right)^2 \leq 1$, le due componenti della formula precedente, con il taglio in direzione 2;
- Il valore del coefficiente di verifica per taglio e torsione ottenuto per quadratura dei coefficienti di verifica per taglio e torsione secondo la formula $\frac{\tau_{tor,d}}{k_{sh} f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_d}{f_{v,d}}\right)^2 \leq 1$, le due componenti della formula precedente, con il taglio in direione 3;
- la combinazione in cui si effettua la verifica e le sollecitazioni corrispondenti;
- **Stabilità** Riporta:
- il valore del coefficiente di verifica per presso-flessione per elementi con snellezza < 0.3;
- la combinazione in cui si effettua la verifica e le sollecitazioni corrispondenti;
- **Svergolamento** Riporta:
- il valore del coefficiente di verifica a svergolamento e, tra parentesi, le due componenti per sollecitazioni di momento flettente M2;

- il valore del coefficiente di verifica a svergolamento e, tra parentesi, le due componenti per sollecitazioni di momento flettente M3;
- la combinazione in cui si effettua la verifica e le sollecitazioni corrispondenti;
- **Deformazioni** Riporta i valori delle massime deformazioni iniziale in combinazione rara, frequente e quasi permanente e i valori delle massime deformazioni a tempo infinito in combinazione rara, frequente e quasi permanente. Questi ultimi calcolati sommando per ogni caso di carico sia il valore istantaneo che il valore ottenuto dall'aliquota quasi-permanente amplificata del fattore k_{def}.

Nella figura che segue si riporta un esempio della funzione sopra descritta utile per analizzare un singolo elemento.



3.Conclusioni

Il lavoro svolto in questa attività di tirocinio ha riguardato la conoscenza del software di progettazione PRO-SAP. In questo lavoro sono state considerate tutte le diverse tipologie di coperture presenti nel convento di S.Bernardino sito in L'Aquila. Per ogni tipologia di copertura esistente si è assunta una conoscenza limitata e per tale motivo si è utilizzato un fattore di confidenza F_c=1.35, tale fattore correttivo tiene conto delle incerte caratteristiche meccaniche dei legni in opera. Grazie all'utilizzo del software di progettazione PRO-SAP è stato possibile effettuare l'analisi della copertura, questa è stata condotta attraverso dei modelli locali, in particolare le capriate sono schematizzate attraverso delle travature reticolari costituite da elementi elastici incernierati alle estremità. Successivamente alla fase di modellazione ed analisi è seguita la fase di verifica dalla quale è stato possibile progettare le nuove strutture lignee nelle parti dove l'attuale copertura è crollata ed inoltre è stato possibile dimensionare le nuove sezioni degli elementi strutturali che non soddisfavano le verifiche.