

Il ruolo dei software di calcolo e il controllo dei risultati: un esempio con PRO_SAP

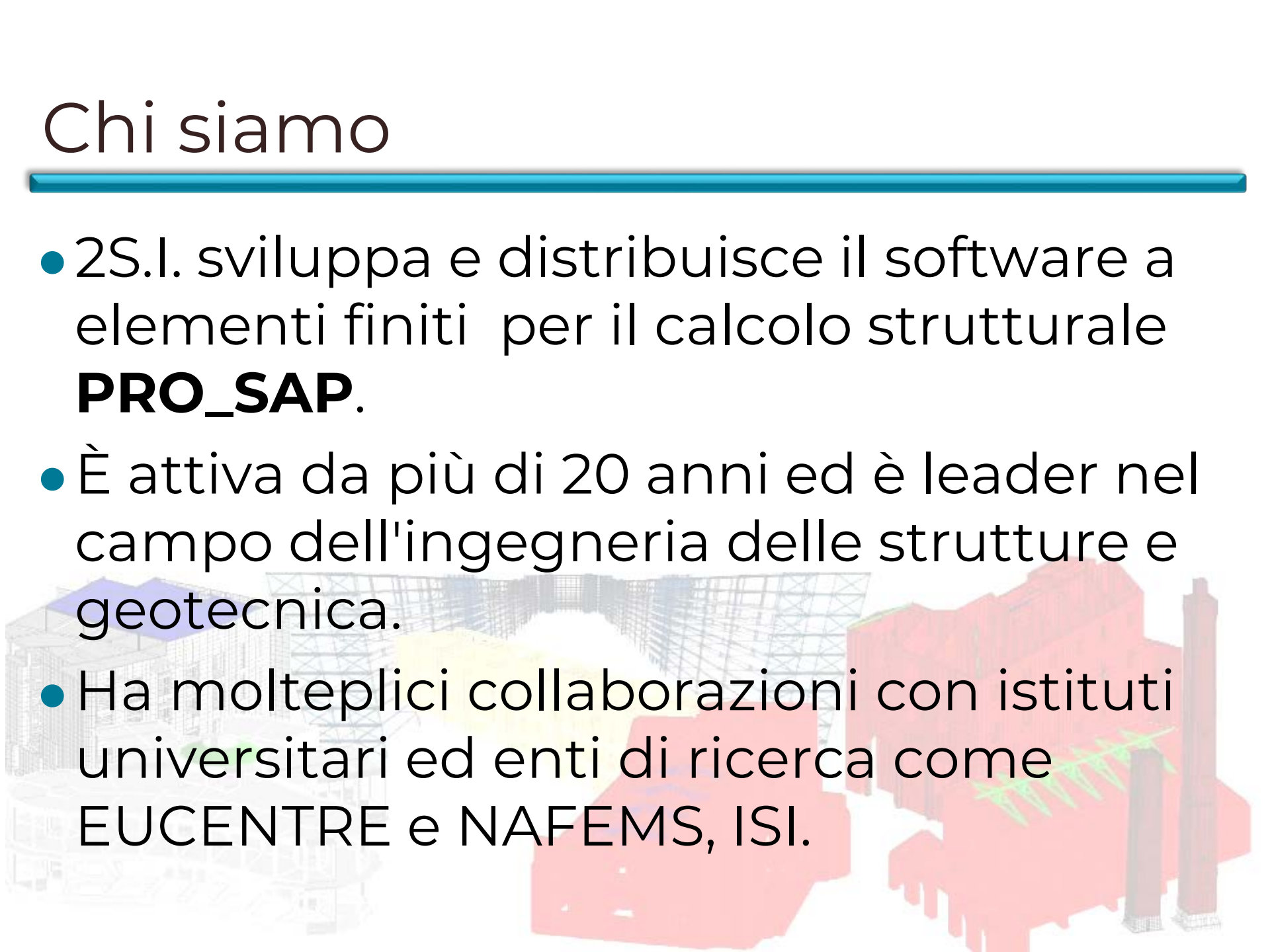
Ing. Gennj Venturini

venturini@2si.it

www.2si.it



Chi siamo

- 2S.I. sviluppa e distribuisce il software a elementi finiti per il calcolo strutturale **PRO_SAP**.
 - È attiva da più di 20 anni ed è leader nel campo dell'ingegneria delle strutture e geotecnica.
 - Ha molteplici collaborazioni con istituti universitari ed enti di ricerca come EUCENTRE e NAFEMS, ISI.
- 
- The background of the slide features several semi-transparent architectural and engineering models. On the left, there is a grey wireframe model of a building structure. In the center, a yellow and white model shows a complex structural grid or truss system. On the right, a red 3D model of a building facade is visible, along with a vertical column and some green structural elements. The overall aesthetic is technical and professional, consistent with the engineering theme of the text.

Fasi del progetto di una struttura



Fasi dell'analisi per cui non serve il software:
Definizione del sistema costruttivo e dello schema strutturale
Dimensionamento di massima (o rilievo dell'esistente)
Identificazione dei materiali
Analisi dei carichi
Scelta del tipo di analisi



Fasi dell'analisi per cui è utile/necessario il software:
Modellazione
Esecuzione analisi
Controllo dei risultati
Progettazione degli elementi strutturali
Controllo dei risultati della progettazione
Generazione degli esecutivi
Controllo dei disegni esecutivi

CAPITOLO 10.**REDAZIONE DEI PROGETTI STRUTTURALI ESECUTIVI E DELLE RELAZIONI DI CALCOLO****10.1. CARATTERISTICHE GENERALI**

I progetti esecutivi riguardanti le strutture devono essere informati a caratteri di chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti e devono inoltre definire compiutamente l'intervento da realizzare.

Restano esclusi i piani operativi di cantiere ed i piani di approvvigionamento.

Il progetto deve comprendere i seguenti elaborati:

- Relazione di calcolo strutturale, comprensiva di una descrizione generale dell'opera e dei criteri generali di analisi e verifica;
- Relazione sui materiali;
- Elaborati grafici, particolari costruttivi;
- Piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera;
- Relazione sui risultati sperimentali corrispondenti alle indagini specialistiche ritenute necessarie alla realizzazione dell'opera.

Particolare cura andrà posta nello sviluppare le relazioni di calcolo, con riferimento alle analisi svolte con l'ausilio del calcolo automatico, sia ai fini di facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli, sia ai fini di consentire elaborazioni indipendenti da parte di soggetti diversi dal redattore del documento.

Il progettista resta comunque responsabile dell'intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l'ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.

10.2. ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista, dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso la documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

10.2.1. RELAZIONE DI CALCOLO

Il progettista dovrà avere cura che nella Relazione di calcolo la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

Tipo di analisi svolta

Occorre preliminarmente:

- dichiarare il tipo di analisi strutturale condotta (di tipo statico o dinamico, lineare o non lineare) e le sue motivazioni;
- indicare il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale e le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni.
- indicare chiaramente le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti. In ogni caso va motivato l'impiego delle combinazioni o dei percorsi di carico adottati, in specie con riguardo alla effettiva esauritività delle configurazioni studiate per la struttura in esame.

Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo

Occorre indicare con precisione l'origine e le caratteristiche dei codici di calcolo utilizzati riportando titolo, autore, produttore, versione, estremi della licenza d'uso o di altra forma di autorizzazione all'uso.

Modalità di presentazione dei risultati.

La quantità di informazioni che usualmente accompagna l'utilizzo di procedure di calcolo automatico richiede un'attenzione particolare alle modalità di presentazione dei risultati, in modo che questi riassumano, in una sintesi completa ed efficace, il comportamento della struttura per quel particolare tipo di analisi sviluppata. In particolare, è necessario che la Relazione di calcolo riporti almeno le seguenti indicazioni:

- descrizione dell'opera e della tipologia strutturale;
- inquadramento normativo dell'intervento;
- definizione dei parametri di progetto;

- descrizione dei materiali adottati e loro caratteristiche meccaniche;
- criteri di progettazione e modellazione;
- combinazioni delle azioni;
- codice di calcolo impiegato;
- rispetto delle verifiche per gli stati limite considerati.

L'esito di ogni elaborazione deve essere sintetizzato in disegni e schemi grafici contenenti, almeno per le parti più sollecitate della struttura, le configurazioni deformate, la rappresentazione grafica delle principali caratteristiche di sollecitazione o delle componenti degli sforzi, i diagrammi di inviluppo associati alle combinazioni dei carichi considerate, gli schemi grafici con la rappresentazione dei carichi applicati e delle corrispondenti reazioni vincolari.

Di tali grandezze, unitamente ai diagrammi ed agli schemi grafici, vanno chiaramente evidenziati le convenzioni sui segni, i valori numerici e le unità di misura di questi nei punti o nelle sezioni significative ai fini della valutazione del comportamento complessivo della struttura, i valori numerici necessari ai fini delle verifiche di misura della sicurezza.

E' opportuno che i tabulati generalmente forniti dai programmi automatici, cui la Relazione di calcolo deve fare riferimento, non facciano parte integrante della Relazione stessa, ma ne costituiscano un allegato.

Informazioni generali sull'elaborazione.

A valle dell'esposizione dei risultati vanno riportate anche informazioni generali riguardanti l'esame ed i controlli svolti sui risultati ed una valutazione complessiva dell'elaborazione dal punto di vista del corretto comportamento del modello.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.

Spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con riferimento a schemi o soluzioni noti e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc.

10.2.2. VALUTAZIONE INDIPENDENTE DEL CALCOLO

Nel caso in cui si renda necessaria una valutazione indipendente del calcolo strutturale o comunque nel caso di opere di particolare importanza, i calcoli più importanti devono essere eseguiti nuovamente da soggetto diverso da quello originario mediante programmi di calcolo diversi da quelli usati originariamente e ciò al fine di eseguire un effettivo controllo incrociato sui risultati delle elaborazioni.



Descrizioni, schemi, ecc.



Controlli svolti



Accettabilità dei risultati

10.2. ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista, dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso la documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

10.2.1. RELAZIONE DI CALCOLO

Il progettista dovrà avere cura che nella Relazione di calcolo la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

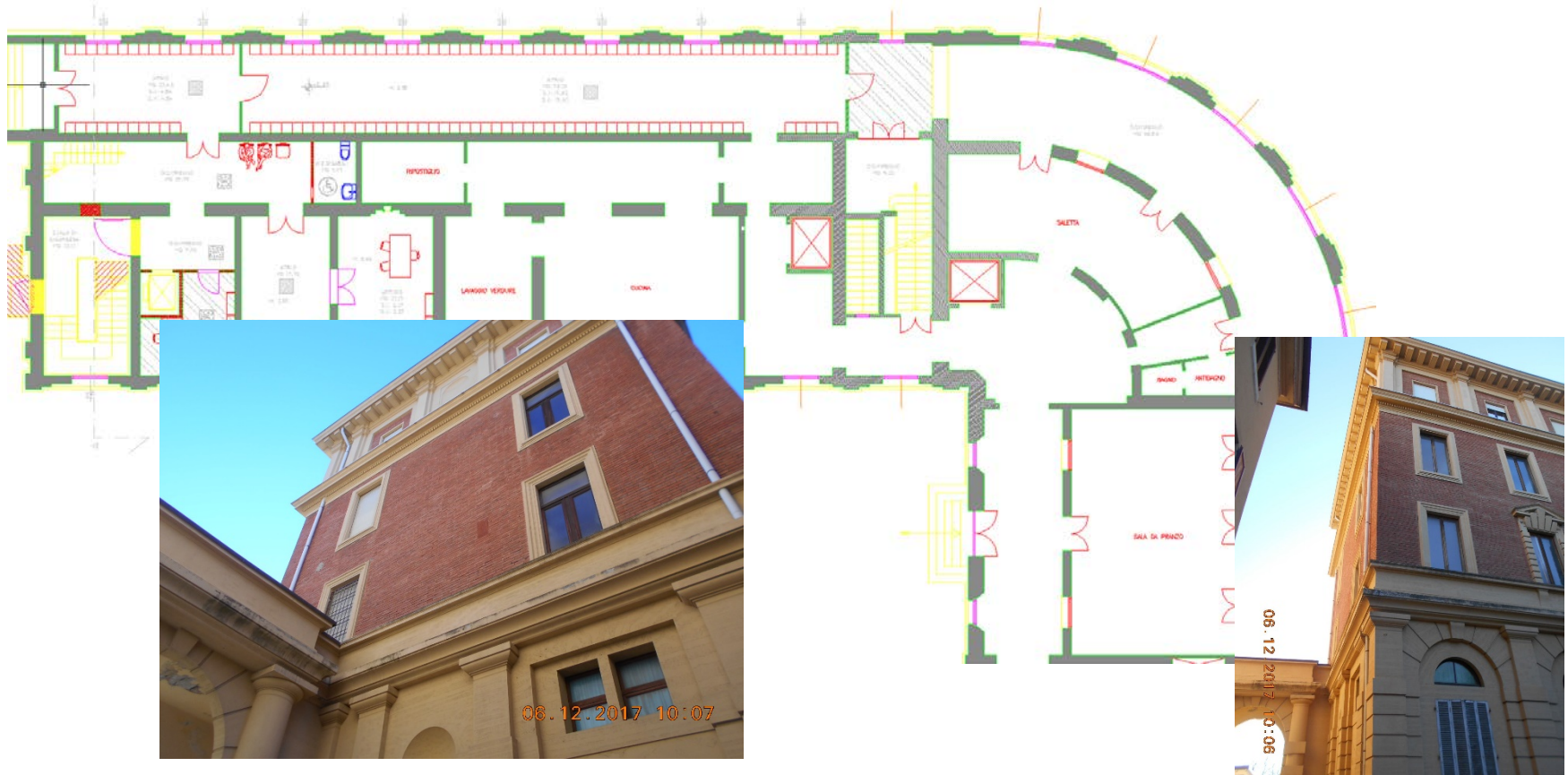
Tipo di analisi svolta

Occorre preliminarmente:

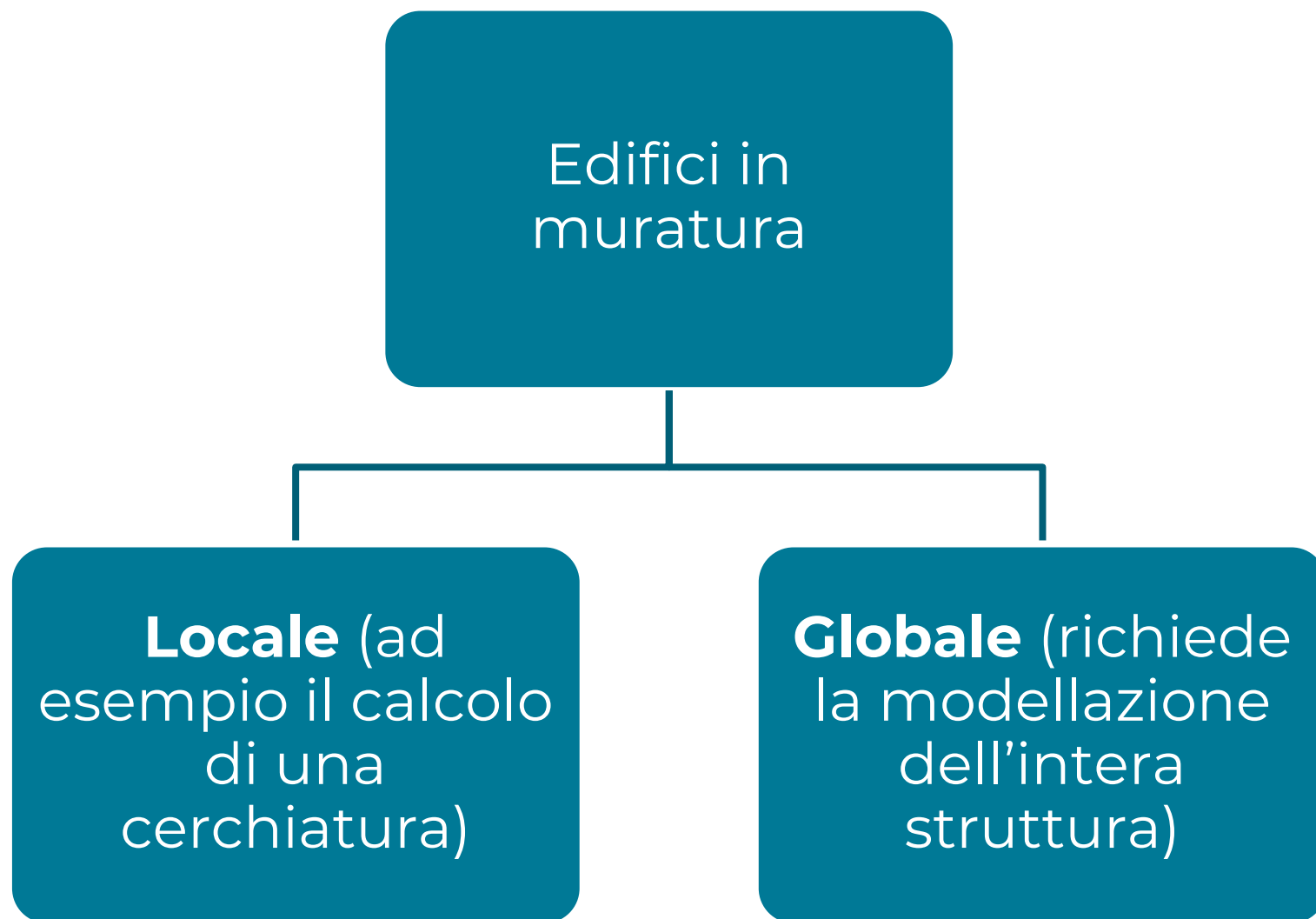
- dichiarare il tipo di analisi strutturale condotta (di tipo statico o dinamico, lineare o non lineare) e le sue motivazioni;
- indicare il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale e le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni.
- indicare chiaramente le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti. In ogni caso va motivato l'impiego delle combinazioni o dei percorsi di carico adottati, in specie con riguardo alla effettiva esaustività delle configurazioni studiate per la struttura in esame.

Esempio applicativo

- Intervento di miglioramento sismico realizzato dallo Studio Ceccoli e Associati



NTC 2018: i tipi di analisi



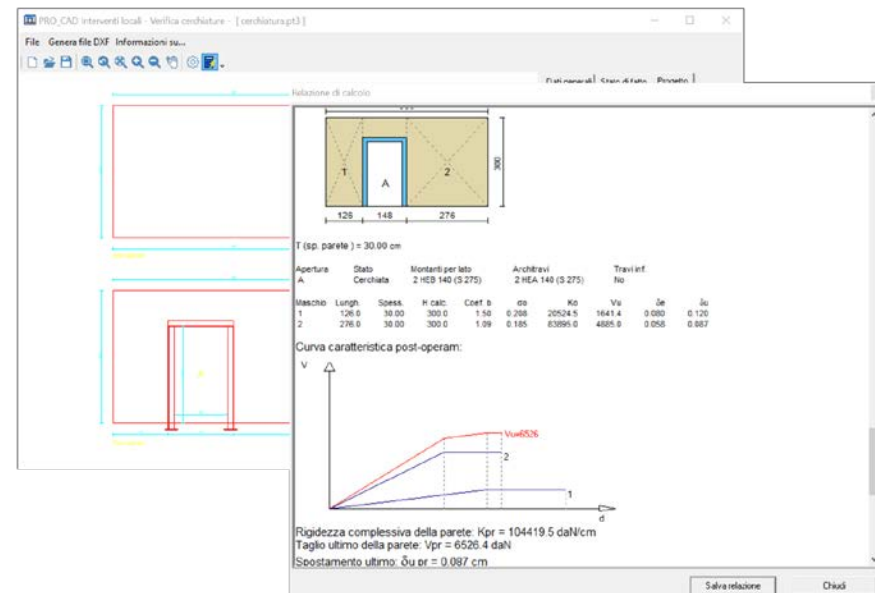
Intervento locale

8.4.1. RIPARAZIONE O INTERVENTO LOCALE

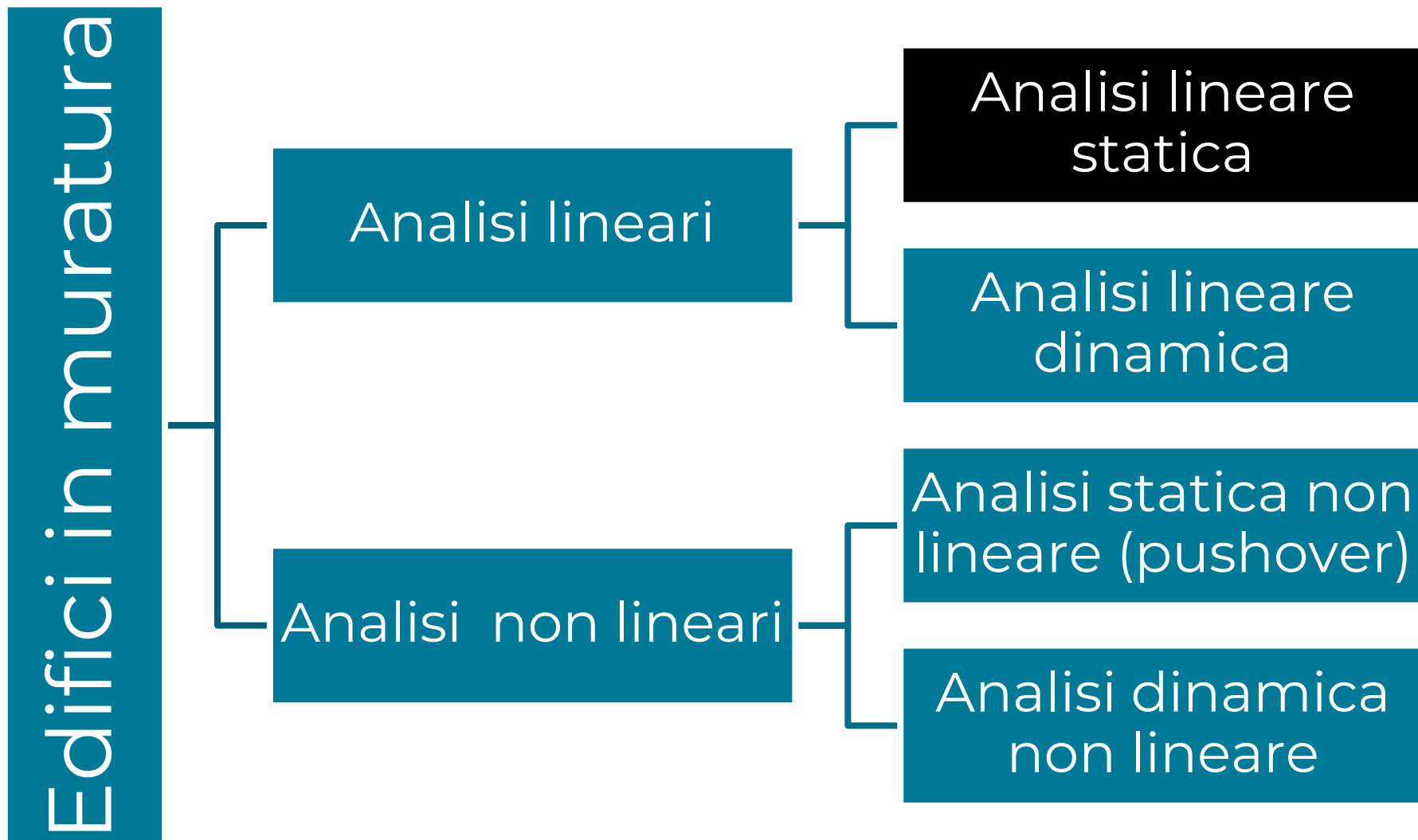
Gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi della struttura. Essi non debbono cambiare significativamente il comportamento globale della costruzione e sono volti a conseguire una o più delle seguenti finalità:

- ripristinare, rispetto alla configurazione precedente al danno, le caratteristiche iniziali di elementi o parti danneggiate;
- migliorare le caratteristiche di resistenza e/o di duttilità di elementi o parti, anche non danneggiati;
- impedire meccanismi di collasso locale;
- modificare un elemento o una porzione limitata della struttura.

Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati, documentando le carenze strutturali riscontrate e dimostrando che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non vengano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi non comportino una riduzione dei livelli di sicurezza preesistenti.



NTC 2018: i tipi di analisi globali



Analisi lineare statica

● Cosa è?

7.3.3.2 ANALISI LINEARE STATICA

L'analisi lineare statica consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze d'inerzia indotte dall'azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino i requisiti specifici riportati nei paragrafi successivi, a condizione che il periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame (T_1) non superi $2,5 T_C$ o T_D e che la costruzione sia regolare in altezza.

Per le sole costruzioni la cui risposta sismica, in ogni direzione principale, non dipenda significativamente dai modi di vibrare superiori, è possibile utilizzare, per comportamenti strutturali sia dissipativi sia non dissipativi, il metodo delle forze laterali o "analisi lineare statica". In essa l'equilibrio è trattato staticamente, l'analisi della struttura è lineare e l'azione sismica è modellata attraverso lo spettro di progetto definito al § 3.2.3.5.

● Quando applicarla?

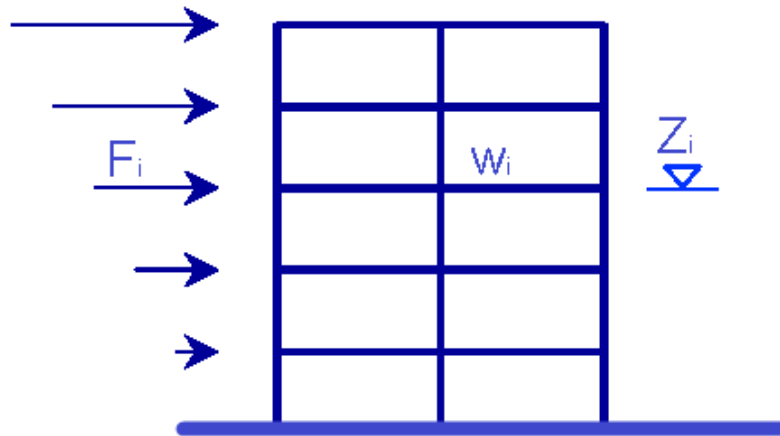
7.8.1.5.2 Analisi lineare statica

È applicabile nei casi previsti al § 7.3.3.2, anche per le costruzioni irregolari in altezza, purché si ponga $\lambda = 1,0$.

Le rigidzze degli elementi murari devono essere calcolate considerando sia il contributo flessionale sia quello tagliante. L'utilizzo di rigidzze fessurate è da preferirsi; in assenza di valutazioni più accurate le rigidzze fessurate possono essere assunte pari alla metà di quelle non fessurate.

Analisi statica lineare (Esk)

- Distribuzione di forze orizzontali che rappresentano, in modo semplificato, l'effetto del primo modo di vibrare

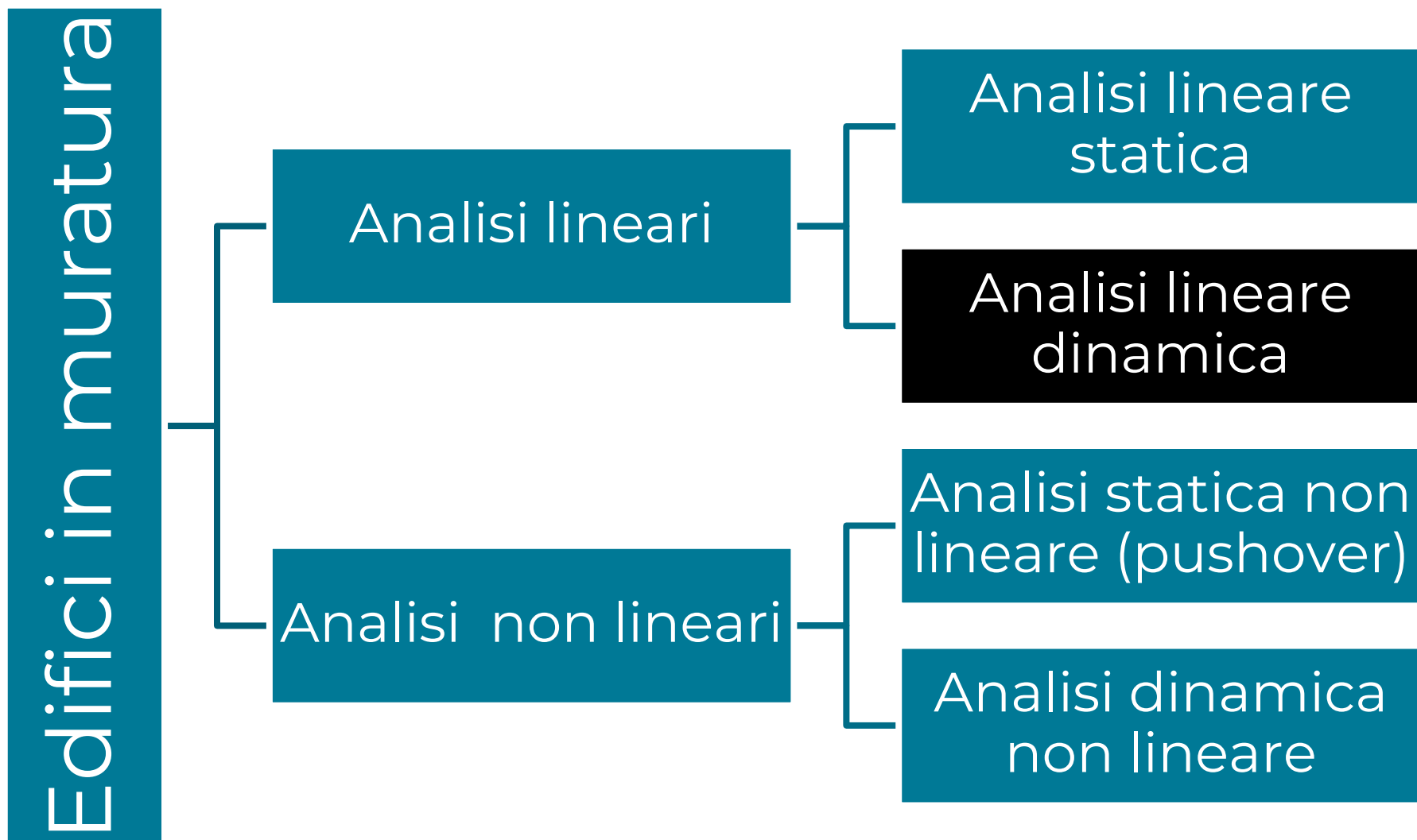


$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$$

Analisi statica lineare



NTC 2018: analisi dinamica lineare



Analisi lineare dinamica

● Cosa è?

7.3.3.1 ANALISI LINEARE DINAMICA

L'analisi lineare dinamica consiste:

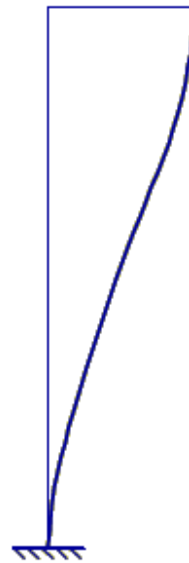
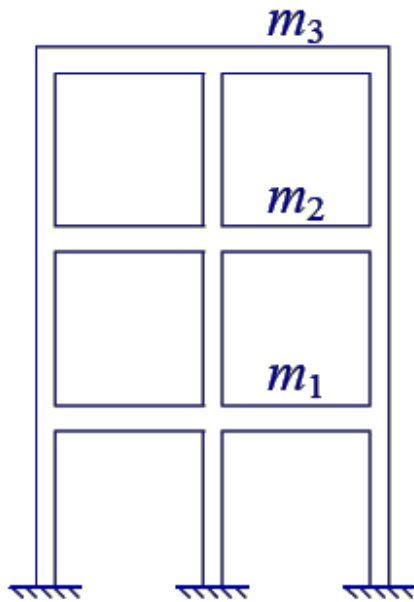
- nella determinazione dei modi di vibrare della costruzione (analisi modale);
- nel calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati;
- nella combinazione di questi effetti.

● Quando applicarla?

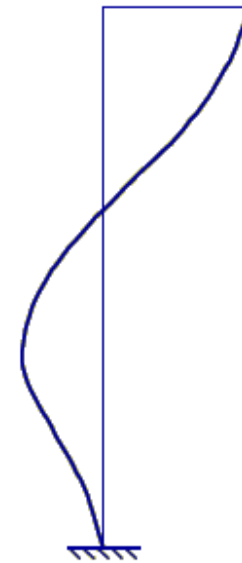
Il metodo d'analisi lineare di riferimento per determinare gli effetti dell'azione sismica, per comportamenti strutturali sia dissipativi sia non dissipativi, è l'analisi modale con spettro di risposta o "analisi lineare dinamica". In essa l'equilibrio è trattato dinamicamente e l'azione sismica è modellata attraverso lo spettro di progetto definito al § 3.2.3.5.

Analisi dinamica (Edk)

- Analisi modale → Determinazione delle forme modali e dei periodi propri della struttura sulla base delle masse e delle rigidità



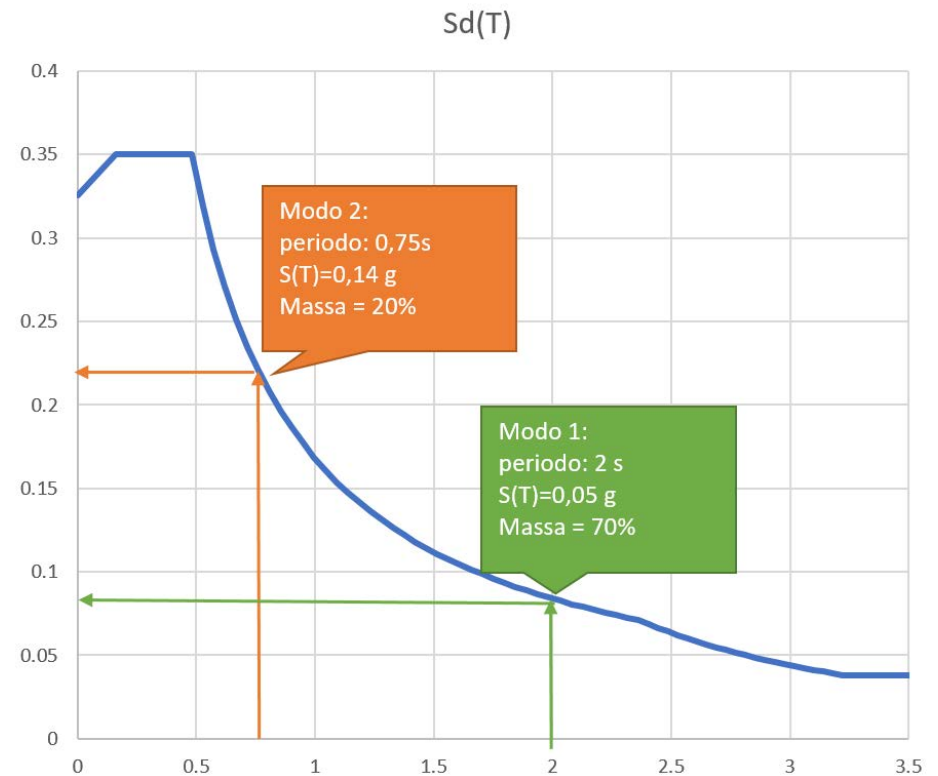
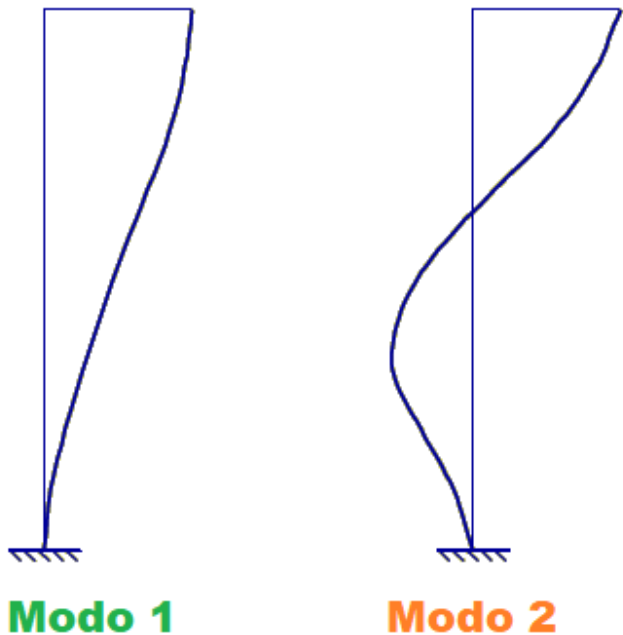
Modo 1
T1



Modo 2
T2

Analisi dinamica (Edk)

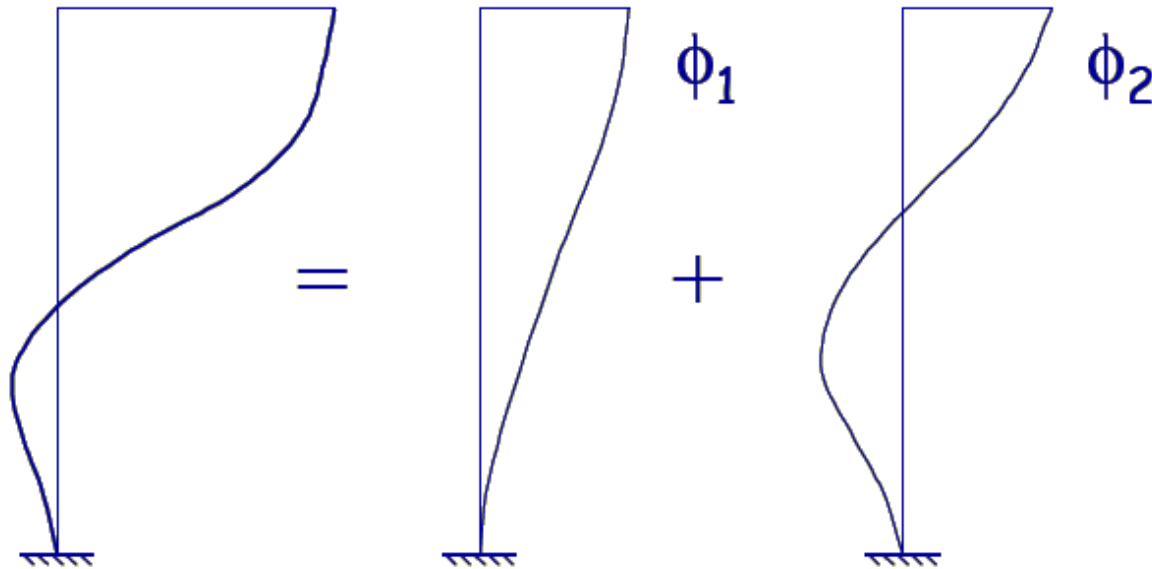
- Analisi spettrale → Calcolo della risposta della struttura **attraverso lo spettro** (in termini di forze, spostamenti, sollecitazioni)



Analisi dinamica (Edk)

Per la combinazione degli effetti relativi ai singoli modi deve essere utilizzata una combinazione quadratica completa degli effetti relativi a ciascun modo, quale quella indicata nell'espressione [7.3.4]:

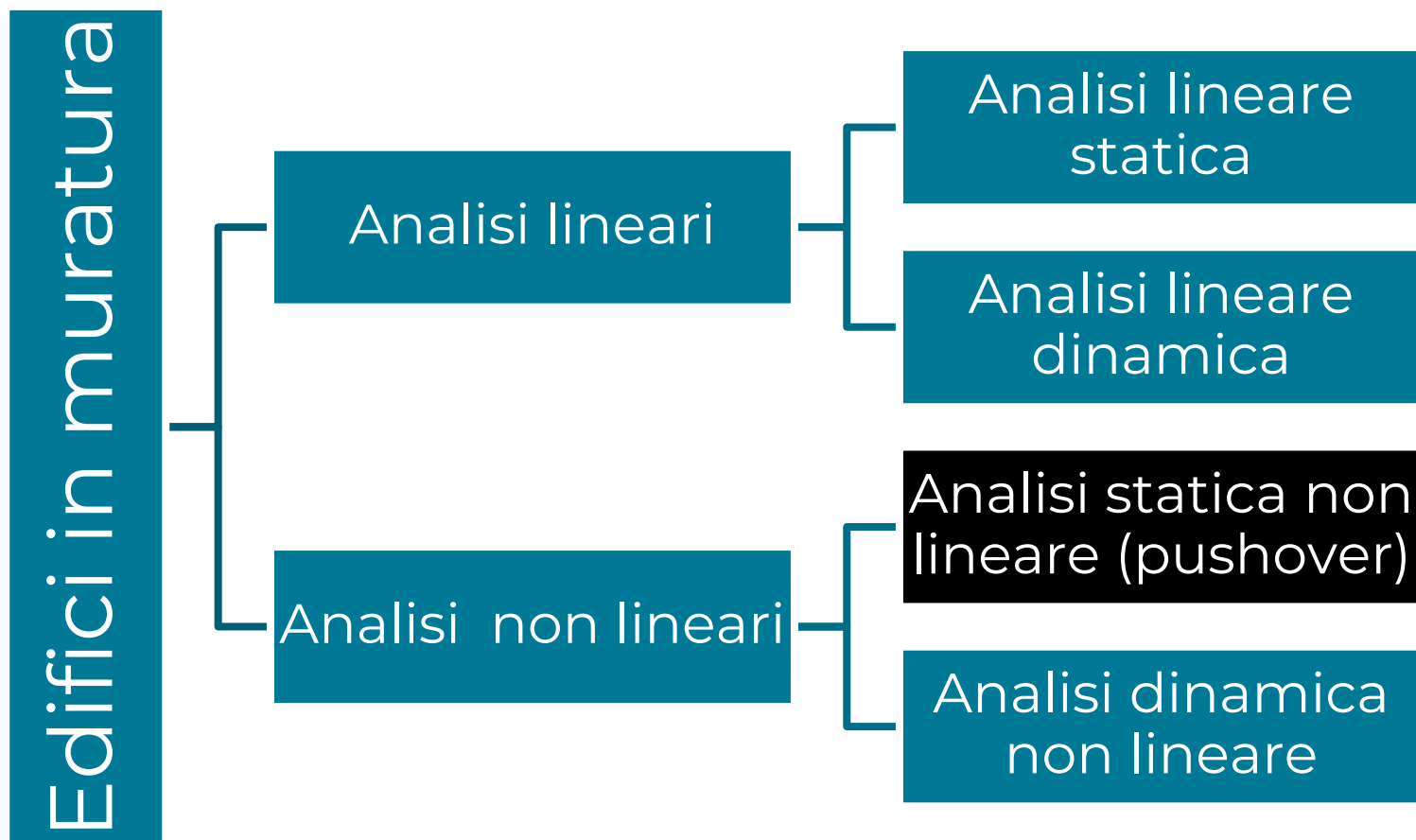
$$E = \sqrt{\sum_i \sum_j \rho_{ij} \cdot E_i \cdot E_j} \quad [7.3.4]$$



Analisi dinamica lineare



NTC 2018: analisi statica non lineare



Analisi non lineare statica

- Cosa è?

7.3.4.2 ANALISI NON LINEARE STATICA

L'analisi non lineare statica richiede che al sistema strutturale reale sia associato un sistema strutturale equivalente non lineare.

Nel caso in cui il sistema equivalente sia ad un grado di libertà, a detto sistema strutturale equivalente si applicano i carichi gravitazionali e, per la direzione considerata dell'azione sismica, in corrispondenza degli orizzontamenti della costruzione, forze orizzontali proporzionali alle forze d'inerzia aventi risultante (taglio alla base) F_b . Tali forze sono scalate in modo da far crescere monotonamente, sia in direzione positiva che negativa e fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale, lo spostamento orizzontale d_c di un punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione (sono esclusi eventuali torrioni). Vanno considerati anche punti di controllo alternativi, come le estremità della pianta dell'ultimo livello, quando sia significativo l'accoppiamento di traslazioni e rotazioni.

Il diagramma $F_b - d_c$ rappresenta la curva di capacità della struttura.

Si devono considerare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2) appresso illustrate.

Analisi non lineare statica

● Quando applicarla?

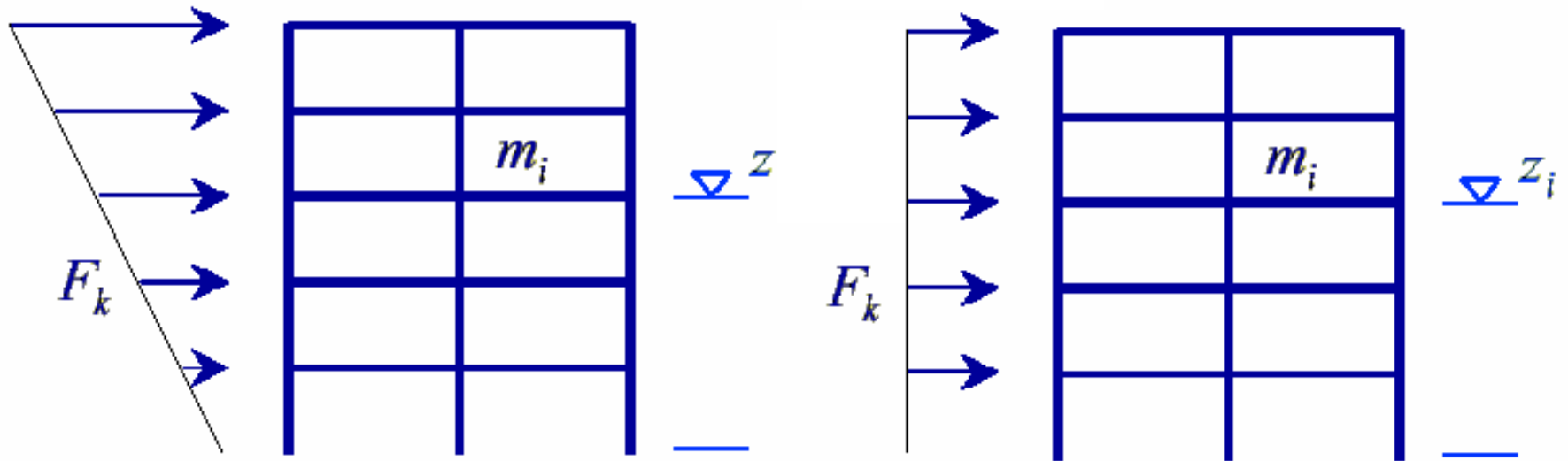
Gruppo 1 - Distribuzioni principali:

- se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non inferiore al 75% si applica una delle due distribuzioni seguenti:
 - distribuzione proporzionale alle forze statiche di cui al § 7.3.3.2, utilizzando come seconda distribuzione la a) del Gruppo 2,
 - distribuzione corrispondente a un andamento di accelerazioni proporzionale alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata;
- in tutti i casi può essere utilizzata la distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano agenti su ciascun orizzontamento calcolate in un'analisi dinamica lineare, includendo nella direzione considerata un numero di modi con partecipazione di massa complessiva non inferiore allo 85%. L'utilizzo di questa distribuzione è obbligatorio se il periodo fondamentale della struttura è superiore a $1,3 T_C$.

7.8.1.5.4 Analisi statica non lineare

L'analisi statica non lineare è applicabile agli edifici in muratura secondo le modalità descritte al § 7.3.4.2, con la possibilità di estendere quanto ivi indicato per le strutture in cui il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non inferiore al 75%, anche ai casi in cui la partecipazione di massa sia non inferiore al 60%.

Analisi statica non lineare (Esk)



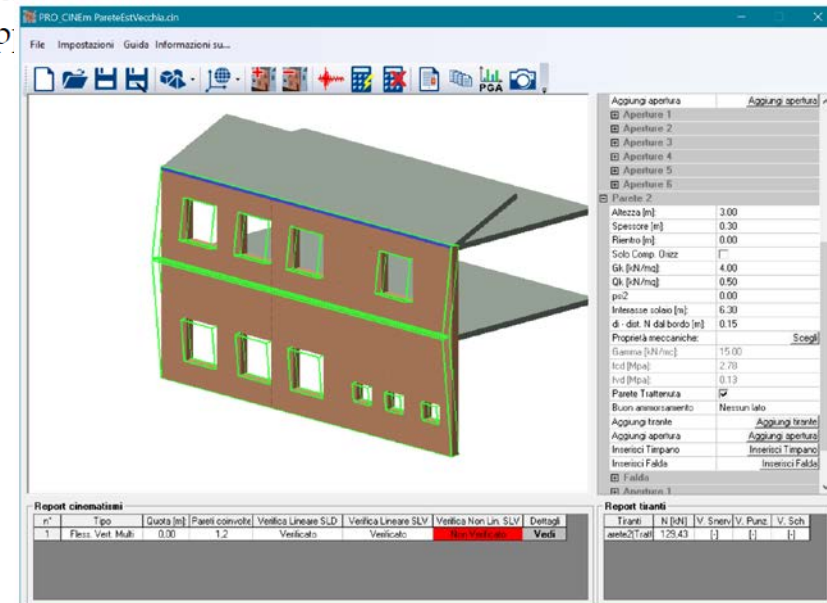
Analisi statica non lineare (Esk)

8.7.1. COSTRUZIONI IN MURATURA

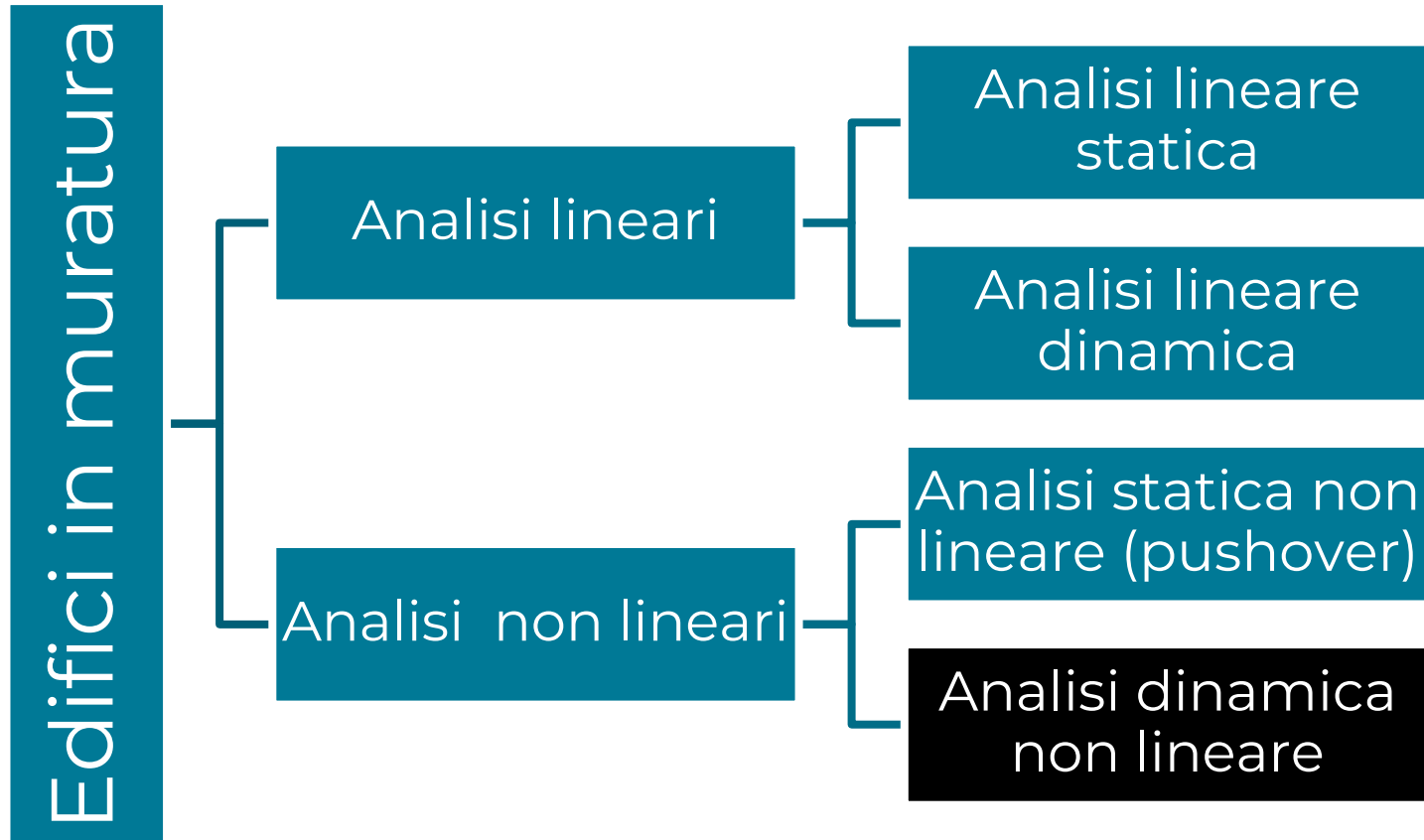
Nelle costruzioni esistenti in muratura, in particolare negli edifici, si possono manifestare meccanismi, sia locali, sia globali. I meccanismi locali interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente fuori del loro piano medio; essi sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti, sia tra pareti e orizzontamenti, sia negli incroci tra pareti. I meccanismi globali sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano medio.

La sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi i tipi di meccanismo.

Per l'analisi sismica dei meccanismi locali si può far ricorso ai metodi dell'analisi limite, tenendo conto, anche se in forma approssimata, della resistenza a compressione della muratura, della tessitura muraria, della qualità della connessione tra pareti murarie e tra pareti e orizzontamenti, della presenza di catene e tiranti. Con tali metodi è possibile valutare la capacità sismica in termini sia di resistenza (applicando un opportuno fattore di comportamento), sia di spostamento (determinando l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sop-



NTC 2018: analisi dinamica non lineare



NTC 2018: analisi dinamica non lineare

7.3.4.1 ANALISI NON LINEARE DINAMICA

L'analisi non lineare dinamica consiste nel calcolo della risposta sismica della struttura mediante integrazione delle equazioni del moto, utilizzando un modello non lineare della struttura e le storie temporali del moto del terreno definite al § 3.2.3.6. Essa ha lo scopo di valutare il comportamento dinamico della struttura in campo non lineare, consentendo il confronto tra duttilità richiesta e duttilità disponibile allo *SLC* e le relative verifiche, nonché di verificare l'integrità degli elementi strutturali nei confronti di possibili comportamenti fragili.

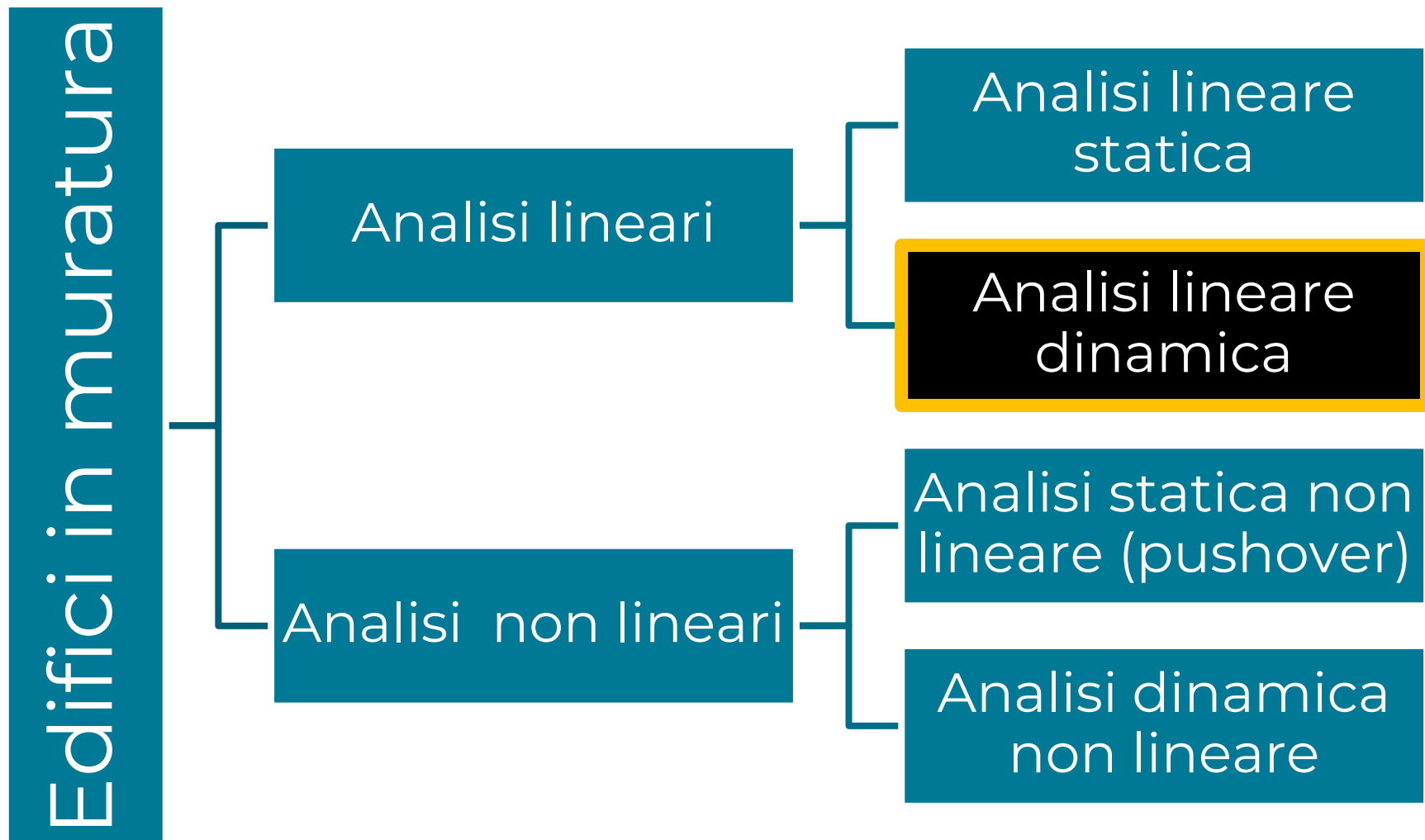
L'analisi non lineare dinamica deve essere confrontata con un'analisi modale con spettro di risposta di progetto, al fine di controllare le differenze in termini di sollecitazioni globali alla base della struttura.

Nel caso delle costruzioni con isolamento alla base l'analisi dinamica non lineare è obbligatoria quando il sistema d'isolamento non può essere rappresentato da un modello lineare equivalente, come stabilito nel § 7.10.5.2. Gli effetti torsionali sul sistema d'isolamento sono valutati come precisato nel § 7.10.5.3.1, adottando valori delle rigidzze equivalenti coerenti con gli spostamenti risultanti dall'analisi. In proposito si può fare riferimento a documenti di comprovata validità.

7.8.1.5.5 Analisi dinamica non lineare

Si applica integralmente il § 7.3.4.1 facendo uso di modelli meccanici non lineari di comprovata e documentata efficacia nel riprodurre il comportamento dinamico e ciclico della muratura.

NTC 2018: gli strumenti a disposizione



Modellazione stato di fatto

- Non entriamo nei dettagli sulla modellazione in PRO_SAP: sul sito www.2si.it sono disponibili videocorsi dettagliati
- Concentriamo il discorso sui controlli che deve fare il progettista per un «uso consapevole» degli strumenti di calcolo

Modellazione stato di fatto



- **Le verifiche strutturali sono state eseguite mediante analisi sismiche sia globali sia locali.**
- Sulla base di quanto prescritto dalla Normativa vigente (DM08), l'analisi globale è stata eseguita applicando come metodologia l'***Analisi dinamica lineare*** con fattore di struttura q operata mediante **PRO_SAP** di 2S.I.

Modellazione stato di fatto

- È stata eseguita una modellazione con elementi plate shell, la dimensione della mesh è circa 50cm x 50 cm.
- Sono stati differenziati maschi e fasce attraverso i criteri di progetto per rispondere alle richieste delle NTC 2018, par. 7.8.1.5 - metodi di analisi

Il modello può essere costituito dai soli elementi murari continui dalle fondazioni alla sommità, collegati ai soli fini traslazionali alle quote dei solai.

In alternativa, gli elementi di accoppiamento fra pareti diverse, quali travi o cordoli in calcestruzzo armato e travi in muratura (qualora efficacemente ammorsate alle pareti), possono essere considerati nel modello, a condizione che le verifiche di sicurezza siano eseguite anche su tali elementi. Per gli elementi di accoppiamento in muratura si seguono i criteri di verifica di cui ai §§ 7.8.1.6, 7.8.2.2 e 7.8.3.2. Possono essere considerate nel modello travi di accoppiamento in muratura ordinaria solo se sorrette da un cordolo di piano o da un architrave resistente a flessione efficacemente ammorsato alle estremità. Per elementi di



Fasi del progetto di una struttura



Fasi dell'analisi per cui non serve il software:
Definizione del sistema costruttivo e dello schema strutturale
Dimensionamento di massima (o rilievo dell'esistente)
Identificazione dei materiali
Analisi dei carichi
Scelta del tipo di analisi

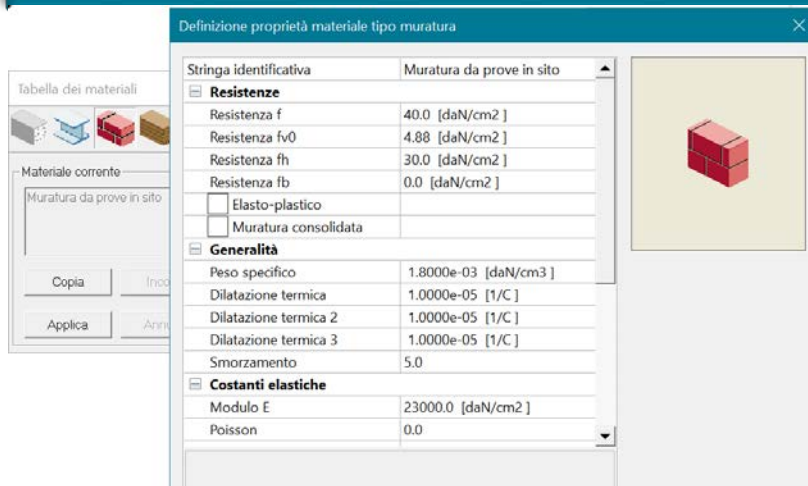


Fasi dell'analisi per cui è utile/necessario il software:

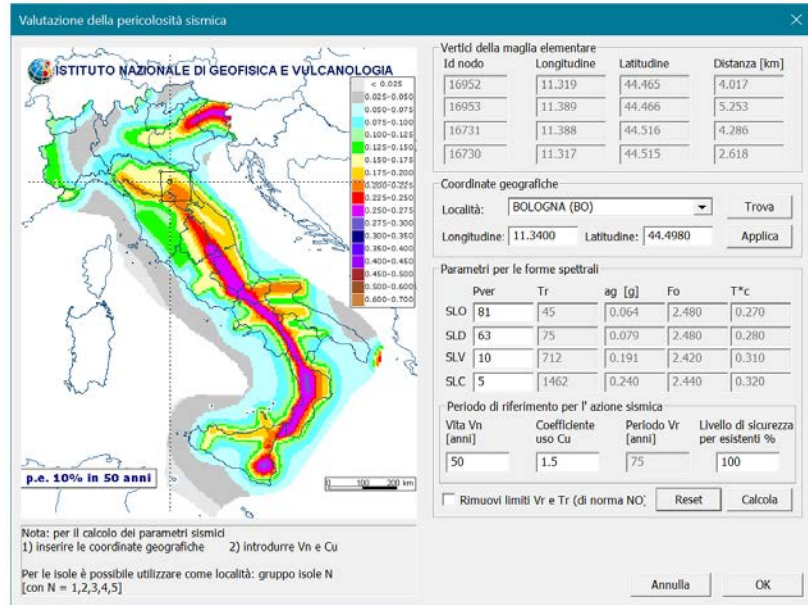


Modellazione
Esecuzione analisi
Controllo dei risultati
Progettazione degli elementi strutturali
Controllo dei risultati della progettazione
Generazione degli esecutivi
Controllo dei disegni esecutivi

Modellazione stato di fatto



- Nell'archivio dei materiali sono stati inseriti i valori che derivano dalle prove
- Per una prima analisi si è assegnato il 100% del sisma previsto dalle NTC



La normativa

Modalità di presentazione dei risultati.

La quantità di informazioni che usualmente accompagna l'utilizzo di procedure di calcolo automatico richiede un'attenzione particolare alle modalità di presentazione dei risultati, in modo che questi riassumano, in una sintesi completa ed efficace, il comportamento della struttura per quel particolare tipo di analisi sviluppata. In particolare, è necessario che la Relazione di calcolo riporti almeno le seguenti indicazioni:

- descrizione dell'opera e della tipologia strutturale;
- inquadramento normativo dell'intervento;
- definizione dei parametri di progetto;
- descrizione dei materiali adottati e loro caratteristiche meccaniche;
- criteri di progettazione e modellazione;
- combinazione delle azioni;
- codice di calcolo impiegato;
- rispetto delle verifiche per gli stati limite considerati.

L'esito di ogni elaborazione deve essere sintetizzato in disegni e schemi grafici contenenti, almeno per le parti più sollecitate della struttura, le configurazioni deformate, la rappresentazione grafica delle principali caratteristiche di sollecitazione o delle componenti degli sforzi, i diagrammi di involuppo associati alle combinazioni dei carichi considerate, gli schemi grafici con la rappresentazione dei carichi applicati e delle corrispondenti reazioni vincolari.

Di tali grandezze, unitamente ai diagrammi ed agli schemi grafici, vanno chiaramente evidenziati le convenzioni sui segni, i valori numerici e le unità di misura di questi nei punti o nelle sezioni significative ai fini della valutazione del comportamento complessivo della struttura, i valori numerici necessari ai fini delle verifiche di misura della sicurezza.

E' opportuno che i tabulati generalmente forniti dai programmi automatici, cui la Relazione di calcolo deve fare riferimento, non facciano parte integrante della Relazione stessa, ma ne costituiscano un allegato.

Modellazione stato di fatto

- Una volta realizzata la modellazione e lanciate le analisi, è possibile passare direttamente alla progettazione automatica?



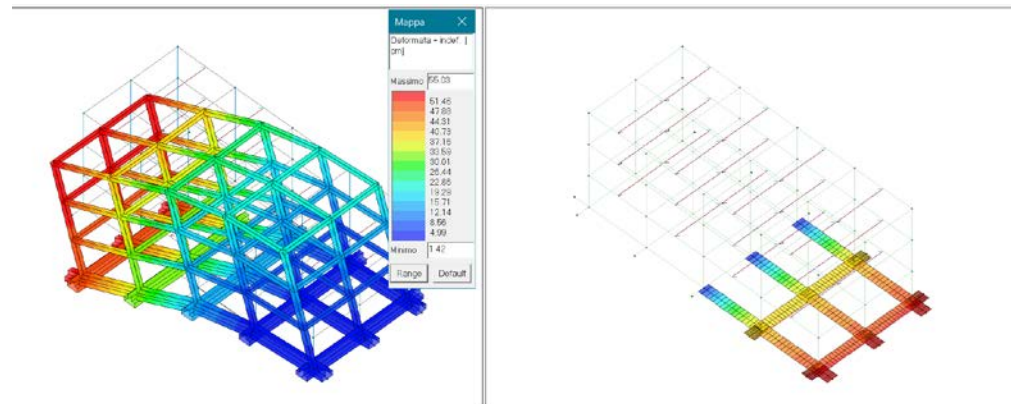
NO!

Modellazione stato di fatto

- **Garbage In, Garbage Out** (letteralmente "Spazzatura Dentro, Spazzatura Fuori") è una frase utilizzata nel campo dell'informatica
- È utilizzata soprattutto per richiamare l'attenzione sul fatto che i computer elaborano in modo acritico anche un insieme di dati in entrata palesemente insensati (Garbage In) producendo, a loro volta, un risultato insensato (Garbage Out).

Controllo dei risultati

- Naturalmente PRO_SAP ha una serie di controlli che intercettano gli errori più comuni.
- Ma non può entrare nel merito dei carichi applicati ai solai o del sistema di vincoli assegnato.



Controllo dei risultati

- Il controllo dei risultati è inoltre prescritto dalle NTC2018 al paragrafo 10.2.1 – relazione di calcolo

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.

Spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con riferimento a schemi o soluzioni noti e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc.

- Vediamo alcuni esempi

Fasi del progetto di una struttura



Fasi dell'analisi per cui non serve il software:
Definizione del sistema costruttivo e dello schema strutturale
Dimensionamento di massima (o rilievo dell'esistente)
Identificazione dei materiali
Analisi dei carichi
Scelta del tipo di analisi



Fasi dell'analisi per cui è utile/necessario il software:

Modellazione
Esecuzione analisi
Controllo dei risultati
Progettazione degli elementi strutturali
Controllo dei risultati della progettazione
Generazione degli esecutivi
Controllo dei disegni esecutivi

Soluzione FEM

- La soluzione di un problema elastico lineare può essere ottenuta attraverso la seguente relazione:

$$\{\mathbf{d}\} = [\mathbf{K}]^{-1} \{\mathbf{f}\}$$

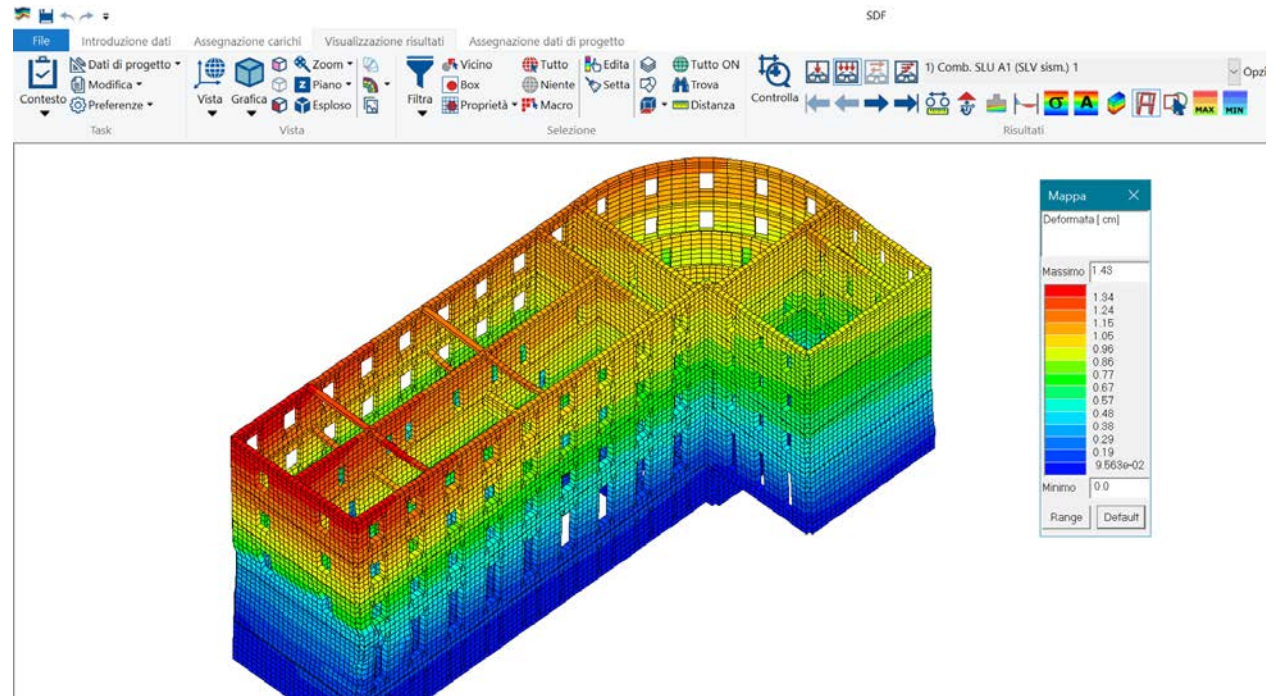
- Una volta noti gli spostamenti dei nodi è noto il campo di spostamenti in ogni elemento \rightarrow il campo di deformazioni $\boldsymbol{\varepsilon}$ è noto per derivazione
- Le tensioni $\boldsymbol{\sigma}$ si ottengono partendo dalle deformazioni attraverso la legge di Hooke generalizzata

Controllo dei risultati: **la deformata**

Le tensioni e le deformazioni sono ottenute

a partire dagli spostamenti

→ il primo controllo da fare è sulla deformata



Controllo dei risultati: **le masse**

Michela + Gil + Senay + Alberto 14/03/2018

$F_{fp} = 36 \times 13 + 12,50 \times 10 + 20 \times 2,00$
 $\approx 800 \text{ kg}$

Carichi impalcato tipo \approx (1000 + 800) 1.2

livello 5
livello 4
livello 3
livello 2
1° impalcato
livello 1

$L_x \approx 2 \times 36 + 2 \times 10 = 108 \times 0.8 = 102.4 \text{ m}^2$

$L_y = 13 \times 2 + 10 \times 2 + 10 = 56 \times 0.8 = 44.8 \text{ m}^2$

$A_x \approx 102 \times 0.45 = 45.9 \text{ m}^2 \Rightarrow 45.9 / 810 = 5.7\%$

$A_y \approx 44 \times 0.45 = 19.8 \text{ m}^2 \Rightarrow 19.8 / 810 = 2.4\%$

$W_{\text{pareti}} \approx 1.8 \times 45.9 = 82.62 \text{ t / medio di altezza}$

$W_{\text{pareti}} \approx 1.8 \times 19.8 = 36.45 \text{ t / medio di altezza}$

$W_{\text{colonne}} \approx (82.62 + 36.45) \times 22 = 2620 \text{ ton}$

→ Si possono poi controllare le masse sismiche

→ Per ogni impalcato la massa è data da:

$$M = \text{Area} * (G + \psi^2 * Q)$$

→ Il peso proprio della muratura è dato da:

$$PP = L * s * h * \gamma$$

$$W = M + PP$$

Controllo dei risultati: **le masse**

| n_i (liv) | h_{ij} | W_i | $W_i h_i$ | ρ_i | $F_i = \frac{W_i}{h_i} \times 0.19 \times 9.7 \times 2.42$ | $F_i h_i$ |
|-------------|----------|-------------------------------------------|-----------|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 22 | 5 | $840 \times 1.2 + 119 \times 2$ 1124.6 | 2241.2 | 1.216 | 246.64 t | 1649.6 t |
| 18 | 4 | $840 \times 0.7 + 119 \times 4$ 1064 | 1915.2 | 1.464 | 521.65 t | 9389.2 |
| 14 | 3 | 1064 | 1489.2 | 1.092 | 405.23 t | 5689.2 |
| 10 | 2 | $840 \times 0.7 + 119 \times 5$ 1183 | 1183 | | | |
| 4 | 1 | $840 \times 1.3 + 119 \times 5$ 1687 | 6748 | | | |

$\sum W_i = 6244$ t
 $\sum W_i h_i = 8007$

$h_G = \frac{\sum W_i h_i}{\sum W_i}$

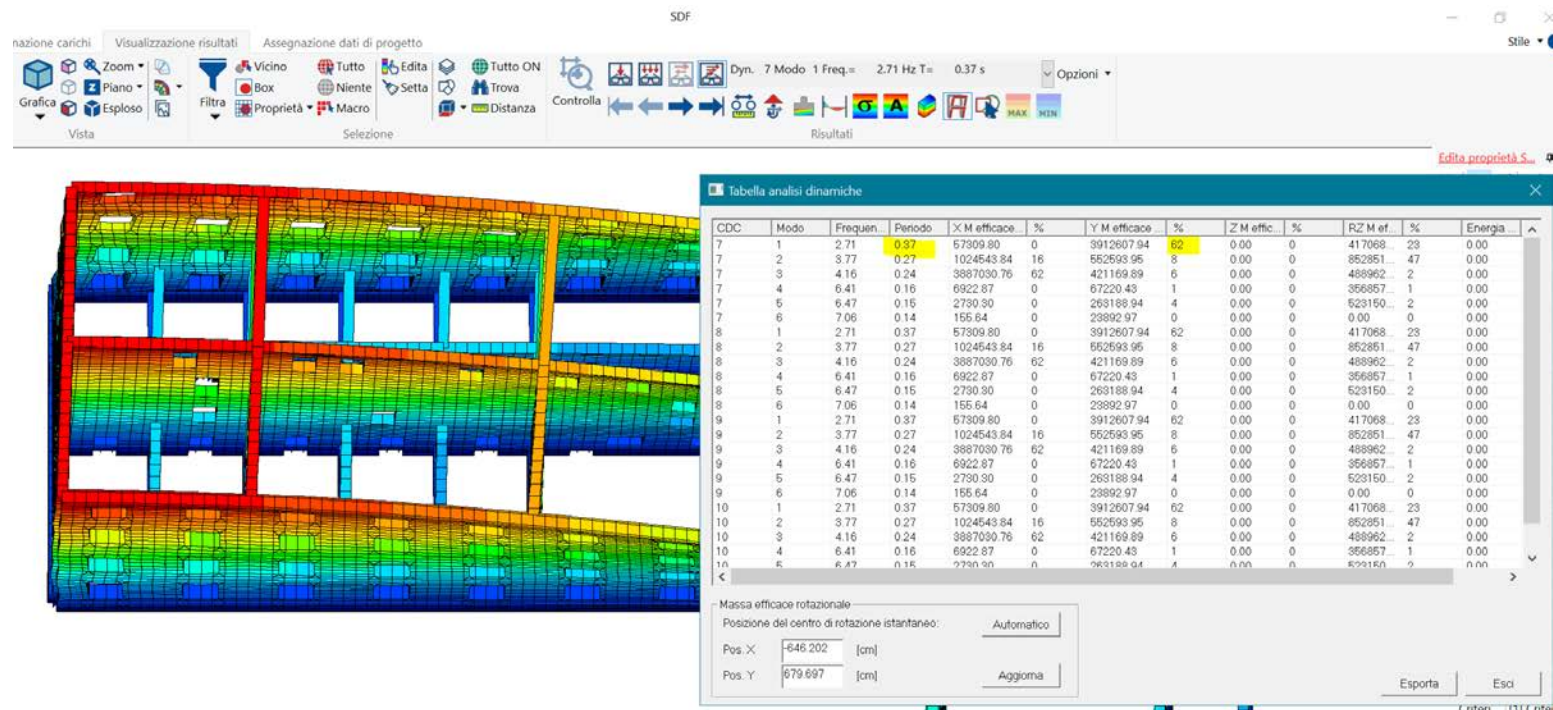
Controllo dello stato - report
 Scrittura file per analisi in corso ...
 CDC 1 Forze risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= -4.751e+06
 CDC 1 Coppie risultanti: X= -1.851e+09 Y= -4.485e+09 Z= 0.000e+00
 CDC 2 Forze risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= -1.969e+06
 CDC 2 Coppie risultanti: X= -9.205e+08 Y= -1.994e+09 Z= 0.000e+00
 CDC 3 Forze risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= 0.000e+00
 CDC 3 Coppie risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= 0.000e+00
 CDC 4 Forze risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= -4.926e+05
 CDC 4 Coppie risultanti: X= -2.686e+08 Y= -5.982e+08 Z= 0.000e+00
 CDC 5 Forze risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= -5.400e+05
 CDC 5 Coppie risultanti: X= -2.321e+08 Y= -5.320e+08 Z= 0.000e+00
 CDC 6 Forze risultanti: X= 0.000e+00 Y= 0.000e+00 Z= -6.456e+04
 CDC 6 Coppie risultanti: X= -2.235e+07 Y= -2.883e+07 Z= 0.000e+00
 CDC dinamico 7 massa risultante = 6.258e+06
 Scrittura file per analisi effettuata.

→ 6244 KN ~ 6258 KN

Controllo dei risultati: i periodi

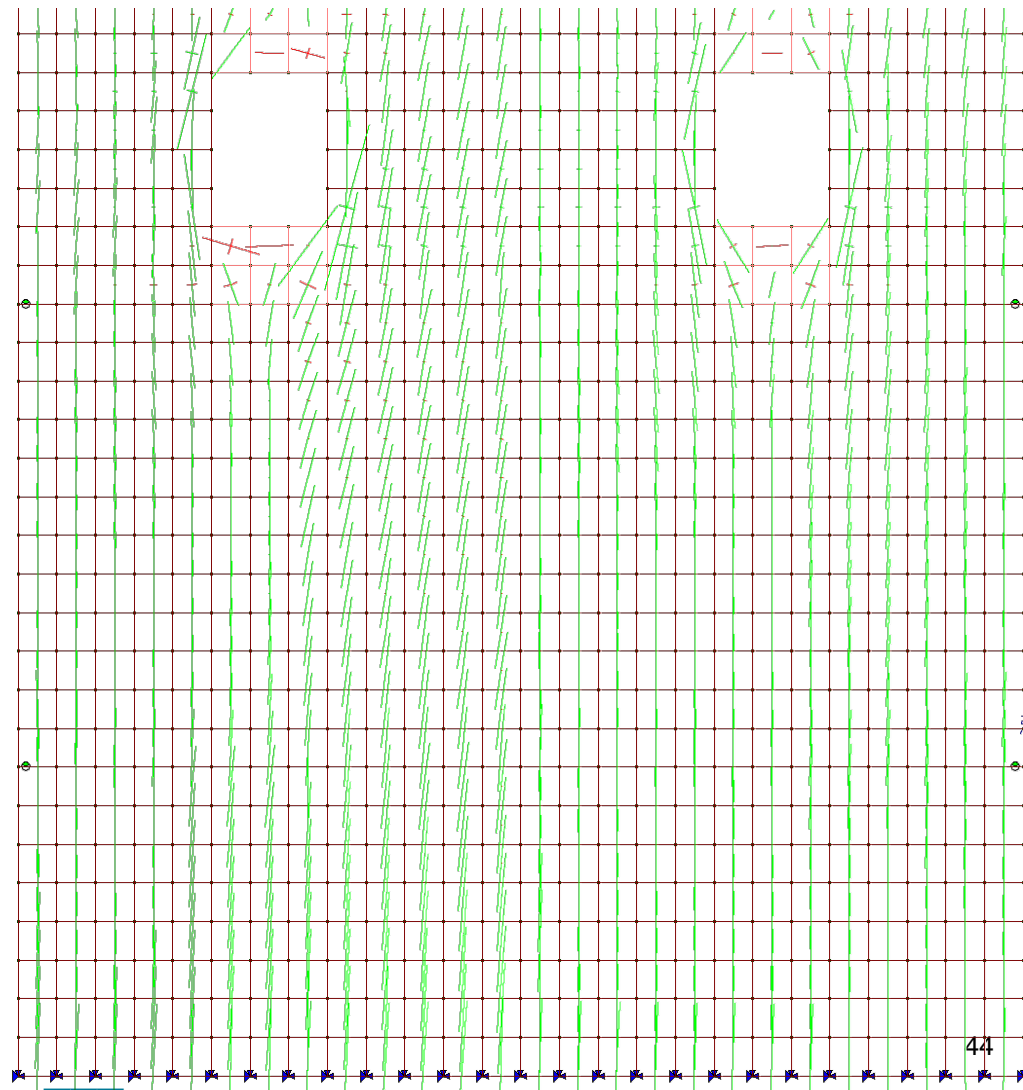
→ In letteratura sono disponibili formulazioni semplificate per la determinazione del periodo proprio. Ad esempio:

$$\rightarrow T = C_1 \cdot H^{3/4} = 0,05 \cdot 18^{3/4} = 0,4 \text{ s} \sim \mathbf{0,37 \text{ s}}$$



Controllo dei risultati: **le sollecitazioni**

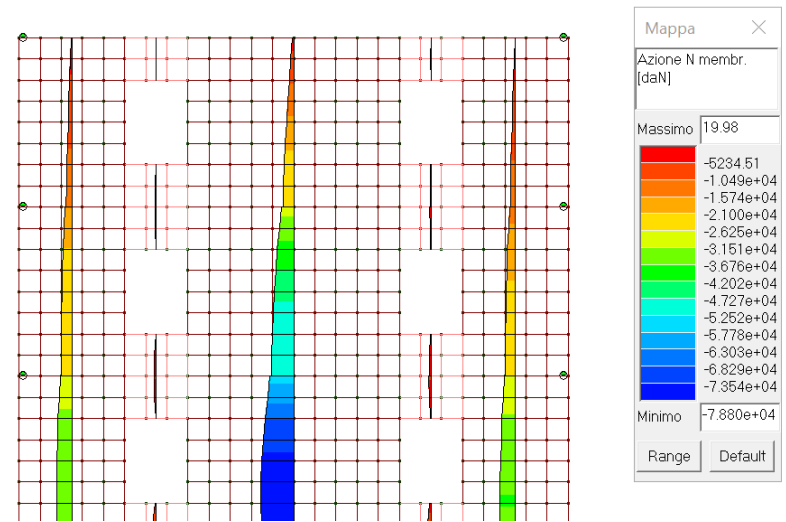
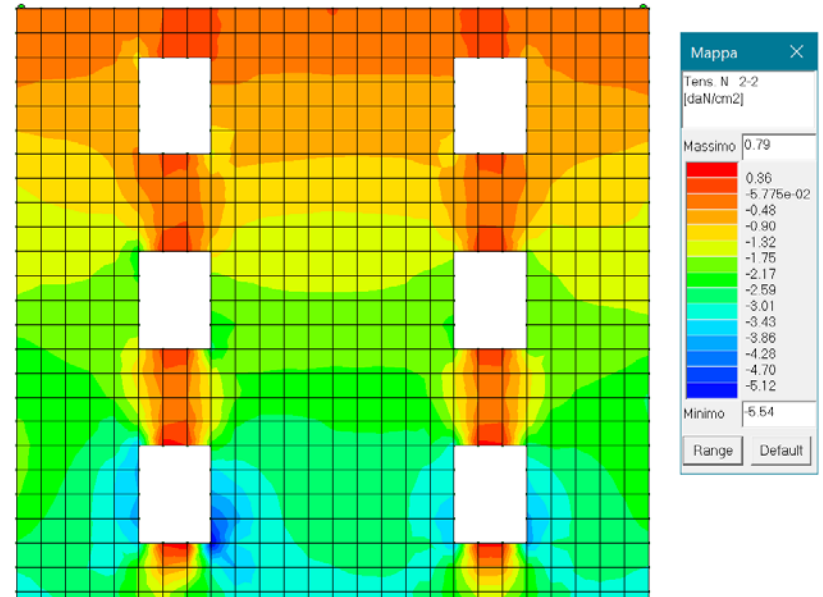
- Infine è possibile avere anche un controllo sulle sollecitazioni.
- Ad esempio sono interessanti le croci N che indicano la direzione delle tensioni principali (rosso trazione, verde compressione)



Controllo dei risultati: **le sollecitazioni**

Anche le sollecitazioni sulle pareti sono controllabili dal progettista.

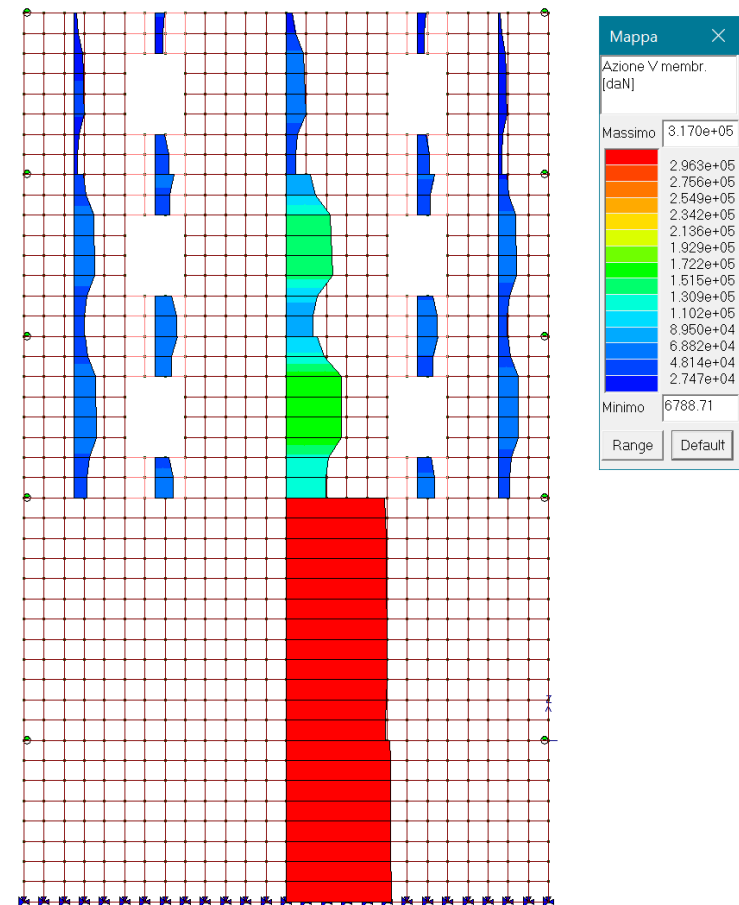
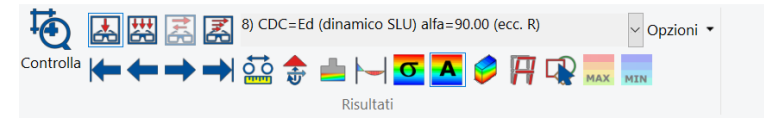
PRO_SAP integra le tensioni di ciascun maschio murario per ottenere le «azioni macro».



Controllo dei risultati: **le sollecitazioni**

Con le azioni macro è quindi possibile controllare lo **sforzo normale di ciascun maschio** e confrontarlo con quello che deriva dall'area d'influenza.

Oppure è possibile calcolare il taglio derivante dall'azione sismica.



Controllo dei risultati: **le sollecitazioni**

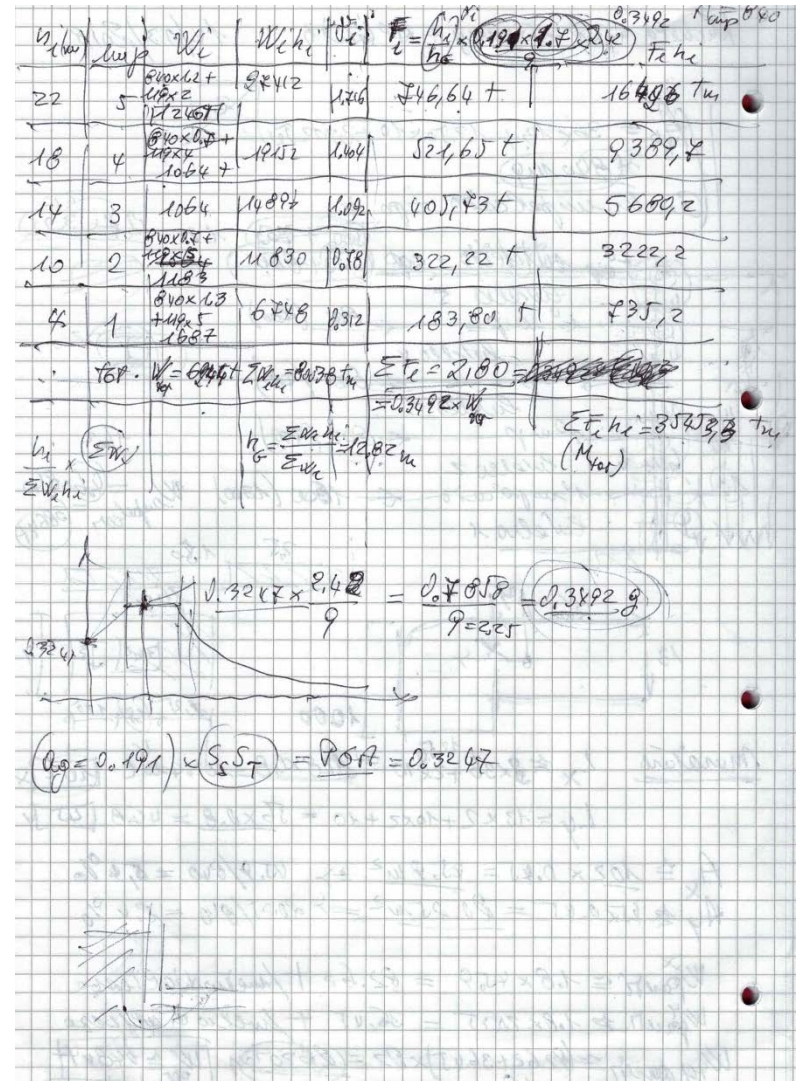
Abbiamo già verificato il periodo T e la massa M.

Quindi sfruttiamo i tabulati.

Con il periodo è possibile entrare nello spettro di progetto e ottenere l'accelerazione

Si può ottenere la forza con la nota equazione:

$$F = M * a$$



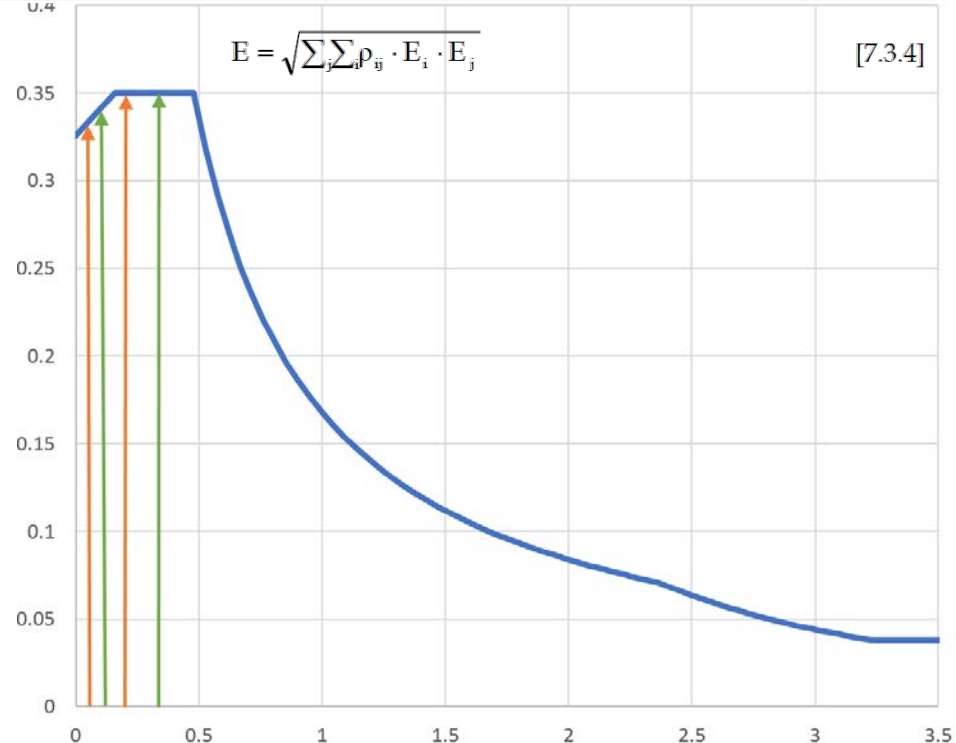
Controllo dei risultati: **le sollecitazioni**

Le NTC 2018 prevedono una combinazione quadratica completa e PRO_SAP la applica, ma per dei conti di larga massima può andare bene anche la radice quadrata della somma dei quadrati:

$$F = \sqrt{\sum m_i * S(T_i)^2}$$

$$= 13'902 \text{KN}$$

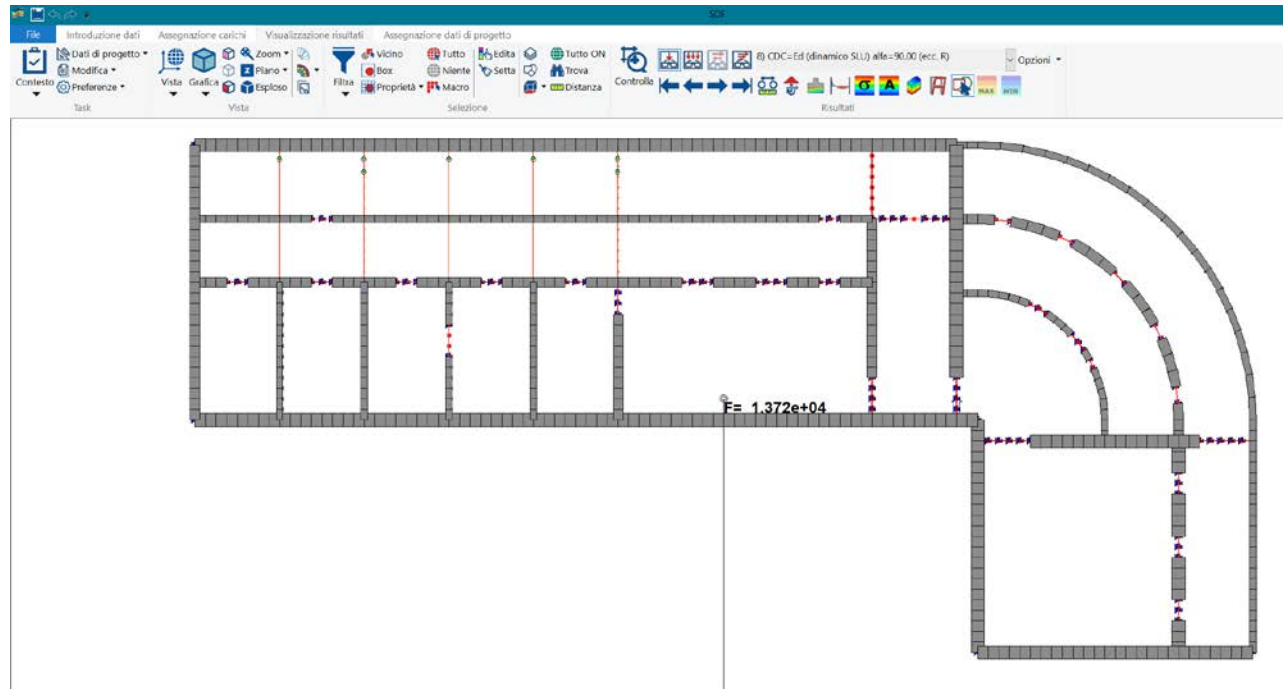
| Modo | Frequenza | Periodo | Acc. Spettrale | M efficace X x | % | M efficace Y x | % |
|----------------|-----------|---------|----------------|----------------|----------|----------------|----------|
| | Hz | sec | g | g | | g | |
| | | | | daN | | daN | |
| 1 | 2.960 | 0.338 | 0.350 | 5.479e+04 | 0.9 | 3.885e+06 | 62.1 |
| 2 | 4.012 | 0.249 | 0.350 | 6.793e+05 | 16.9 | 6.695e+05 | 10.7 |
| 3 | 4.358 | 0.229 | 0.350 | 4.228e+06 | 67.6 | 3.276e+05 | 5.2 |
| 4 | 6.454 | 0.155 | 0.350 | 4850.17 | 7.75e-02 | 43.87 | 7.01e-04 |
| 5 | 6.942 | 0.144 | 0.348 | 529.65 | 8.46e-03 | 5.743e+04 | 0.9 |
| 6 | 7.897 | 0.127 | 0.345 | 1894.08 | 3.03e-02 | 1.670e+05 | 2.7 |
| 7 | 8.491 | 0.118 | 0.344 | 6225.22 | 9.95e-02 | 2.469e+05 | 3.9 |
| 8 | 8.797 | 0.114 | 0.343 | 9341.36 | 0.1 | 2.048e+05 | 3.3 |
| 9 | 8.883 | 0.113 | 0.343 | 7.03 | 1.12e-04 | 230.53 | 3.68e-03 |
| Risulta | | | | 4.985e+06 | | 5.558e+06 | |
| In percentuale | | | | 85.65 | | 88.82 | |



Controllo dei risultati: **le sollecitazioni**

$$F_d = \sqrt{\sum m_i * S(T_i)^2} = 13'902 \text{ KN} \sim \mathbf{13'720 \text{ KN}}$$

Con i risultati globali in PRO_SAP è possibile interrogare il taglio totale: 13'720 KN

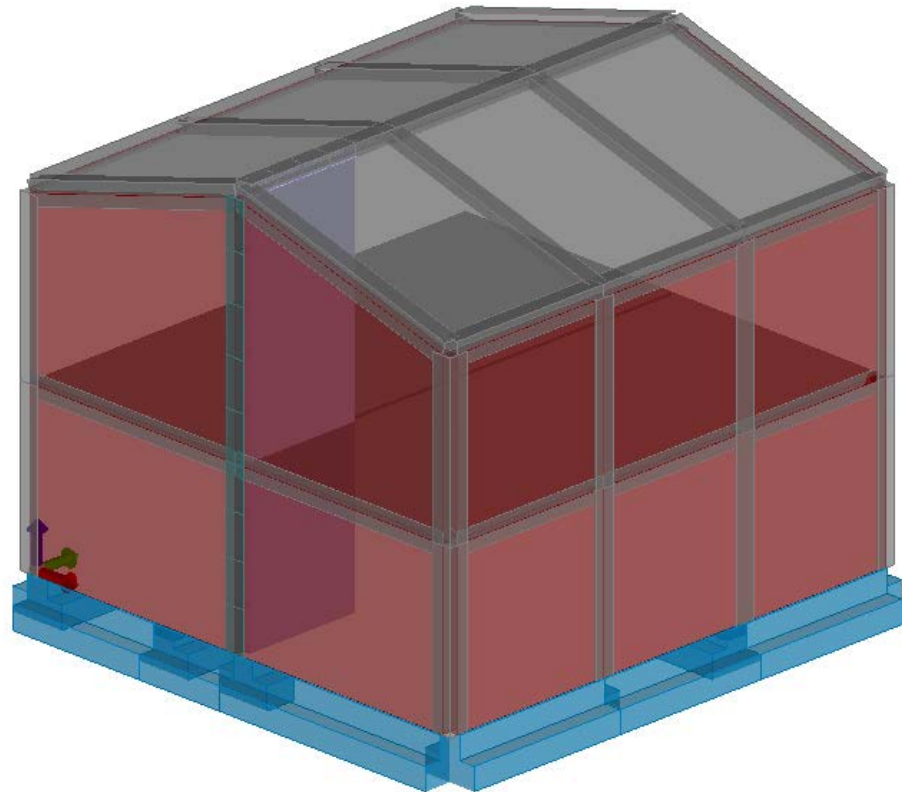


Risultati analisi: controlli

| Controllo | Metodo |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Deformata | Andamento qualitativo |
| Massa di piano | $M = \text{Area} * (G + \psi^2 * Q)$ $PP = L * s * h * \text{gamma}$ |
| Taglio di piano | $F = m * a$ |
| Periodo proprio | $T = C_1 \cdot H^{3/4}$ |
| Croci di membrana | Andamento qualitativo |
| Sforzo normale di membrana | Sollecitazioni dovute all'area di influenza |

Esempio 2

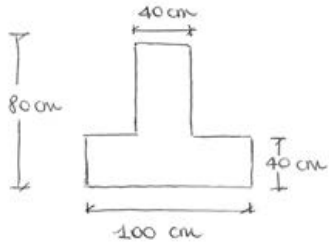
- Struttura in cemento armato con fondazioni



CALCOLO PRESSIONI TRAVE DI FONDAZIONE

• COMBINAZIONE 82 SLE (RARA) •

PESO PROPRIO TRAVE DI FONDAZIONE



$$\text{AREA } A = 5600 \text{ cm}^2$$

C25/30

$$\text{Peso specifico } \gamma = 0.0025 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^3}$$

$$I_{Ptf} = A \cdot \gamma = 5600 \cdot 0.0025 = 14 \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

SOLAIO DI PIANO

$$G_{1s} = 0.045 \cdot \frac{L}{2} = 0.045 \cdot \frac{290}{2} = 6.525 \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

$$G_{2s} = 0.01 \cdot \frac{L}{2} = 0.01 \cdot \frac{290}{2} = 1.45 \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

$$Q_s = 0.02 \cdot \frac{L}{2} = 0.02 \cdot \frac{290}{2} = 2.9 \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

SOLAIO DI COPERTURA

$$G_{1c} = 0.05 \cdot \frac{L}{2} = 0.05 \cdot \frac{290}{2} = 7.25 \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

$$G_{2c} = 0$$

$$Q_n = 0.004P \cdot \frac{L}{2} \cdot \psi_0 = 0.004P \cdot \frac{290}{2} \cdot 0.5 = 0.34P \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

PANNELLI

$s = 30 \text{ cm}$ SPESSORE

$$\gamma = 0.0011 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^3} \text{ Peso specifico}$$

$$H^* = \frac{H_1 + H_2}{2} = \frac{600 + 720}{2} = 660 \text{ cm}$$

$$I_{Pp} = S \cdot \gamma \cdot H^* = 30 \cdot 0.0011 \cdot 660 = 21.7P \frac{\text{daN}}{\text{cm}}$$

CARICO TOTALE

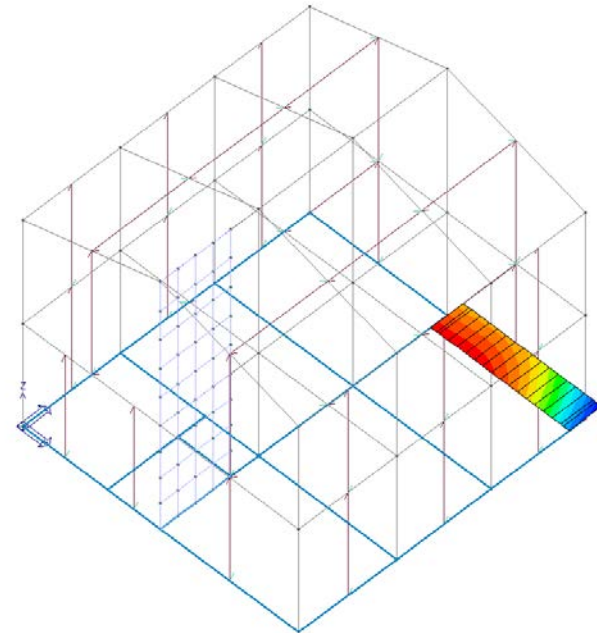
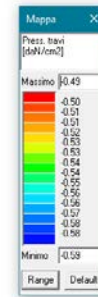
$$\begin{aligned}
 Q_{TOT} &= I_{Ptf} + G_{1s} + G_{2s} + Q_s + G_{1c} + \cancel{G_{2c}} + Q_n + I_{Pp} = \\
 &= 14 + 6.525 + 1.45 + 2.9 + 7.25 + 0.34P + 21.7P = \\
 &= 54.253 \frac{\text{daN}}{\text{cm}}
 \end{aligned}$$

PRESSIONE TRAVE DI FONDAZIONE

$$p = \frac{Q_{TOT}}{B} = \frac{54.253}{1.00} = 0.54 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{RO-SAP} = \frac{0.49 + 0.59}{2} = 0.54 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$$

ERT. 0,0%



CALCOLO PESO DELLA STRUTTURA

DATI GEOMETRICI

$H_1 = 300 \text{ cm}$ Sezioni
 $H_2 = 360 \text{ cm}$ bp: 35 cm } $A_p = 1225 \text{ cm}^2$
 hp: 35 cm }
 $L_x = 484 \text{ cm}$ bt: 30 cm } $A_T = 1200 \text{ cm}^2$
 $L_y = 880 \text{ cm}$ ht: 40 cm }
 $m_{Tx} = 4$ $s_s = 30 \text{ cm}$
 $m_{Ty} = 3$ $L_s = 216 \text{ cm}$
 $m_p = 12$ $A_{fond} = 5600 \text{ cm}^2$
 $H_s = 720 \text{ cm}$ $P_{cls} = 0.0025 \text{ daN/cm}^2$
 $P_{tmp} = 0.001 \text{ daN/cm}^2$
 $S_{tmp} = 30 \text{ cm}$

solai intonaco
 $G_{1K} = 0.045 \text{ daN/cm}^2$
 $G_{2K} = 0.01 \text{ daN/cm}^2$
 $Q_{1K} = 0.02 \text{ daN/cm}^2$
 $\Psi_2 = 0.3$

solai copertura
 $G_{1K} = 0.05 \text{ daN/cm}^2$
 $G_{2K} = 0 \text{ daN/cm}^2$
 $Q_{1K} = 0.0048 \text{ daN/cm}^2$
 $\Psi_2 = 0$

► Peso Proprio della Struttura (Pilastri-Travi-Fondazione)-Setto

$$I^{\circ} \text{ piano} = A_T \cdot P_{cls} \cdot (m_{Tx} \cdot L_x + m_{Ty} \cdot L_y) + A_p \cdot P_{cls} \cdot m_p \cdot H_s = 29121 \text{ daN}$$

$$II^{\circ} \text{ piano} = A_T \cdot P_{cls} \cdot (m_{Tx} \cdot L_x + m_{Ty} \cdot L_y) + A_p \cdot P_{cls} \cdot m_p \cdot H_2 = 31326 \text{ daN}$$

$$Fond = A_{fond} \cdot P_{cls} \cdot L_{fond} = 84448 \text{ daN}$$

$$setto = s_s \cdot L_s \cdot H_s \cdot P_{cls} = 11664 \text{ daN}$$

TOT. 163041 daN

► Peso carico strutturale solai G_{1K}

$$I^{\circ} \text{ piano} = G_{1K} \cdot L_x \cdot L_y = 33580.8 \text{ daN}$$

$$II^{\circ} \text{ piano} = G_{1K} \cdot L_x \cdot L_y = 38692.72 \text{ daN}$$

TOT. 72273.52 daN

► Peso carico non strutturale solai G_{2K}

$$I^{\circ} \text{ piano} = G_{2K} \cdot L_x \cdot L_y = 7462.4 \text{ daN}$$

$$II^{\circ} \text{ piano} = 0 \quad \cdot \quad 0 \text{ daN}$$

TOT. 7462.4 daN

► Peso carico accidentale solai Q_{1K}

$$I^{\circ} \text{ piano} = Q_{1K} \cdot L_x \cdot L_y = 14924.8 \text{ daN}$$

► Peso carico neve solai copertura Q_{1K}

$$II^{\circ} \text{ piano} = Q_{1K} \cdot L_x \cdot L_y = 3581.952 \text{ daN}$$

► Peso tamponatura

$$I^{\circ} \text{ piano} = P_{tmp} \cdot S_{tmp} \cdot H_s \cdot (L_x + L_y) \cdot 2 = 34214.4 \text{ daN}$$

$$II^{\circ} \text{ piano} = P_{tmp} \cdot S_{tmp} \cdot [(H_1 - H_2) \cdot L_y + H_2 \cdot L_x] = 37572.48 \text{ daN}$$

TOT 71786.88 daN

► Calcolo del Peso Sismico

$$W = G_{1K3} + G_{2K3} + \Psi_2 Q_{1K} + \Psi_2 Q_{2K} + G_{2pKII} + 0.5 G_{2pKI} + G_{1KII} + A_T \cdot P_{cls} \cdot (m_{Tx} \cdot L_x + m_{Ty} \cdot L_y) + A_p \cdot P_{cls} \cdot m_p \cdot \frac{H_s}{2} + G_{1Ksetto} = 205491 \text{ daN}$$

| Controllo dello stato - report | | | |
|----------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| Scrittura file per analisi in corso... | | | |
| CDC 1 Forze risultanti: | X= 0.000e+00 | Y= 0.000e+00 | Z= -1.620e+05 |
| CDC 1 Coppie risultanti: | X= -6.585e+07 | Y= 6.773e+07 | Z= 0.000e+00 |
| CDC 2 Forze risultanti: | X= 0.000e+00 | Y= 0.000e+00 | Z= -7.236e+04 |
| CDC 2 Coppie risultanti: | X= -3.184e+07 | Y= 3.068e+07 | Z= 0.000e+00 |
| CDC 3 Forze risultanti: | X= 0.000e+00 | Y= 0.000e+00 | Z= -7.462e+03 |
| CDC 3 Coppie risultanti: | X= -3.283e+06 | Y= 3.164e+06 | Z= 0.000e+00 |
| CDC 4 Forze risultanti: | X= 0.000e+00 | Y= 0.000e+00 | Z= -7.151e+04 |
| CDC 4 Coppie risultanti: | X= -3.144e+07 | Y= 3.031e+07 | Z= 0.000e+00 |
| CDC 5 Forze risultanti: | X= 0.000e+00 | Y= 0.000e+00 | Z= -1.492e+04 |
| CDC 5 Coppie risultanti: | X= -6.567e+06 | Y= 6.328e+06 | Z= 0.000e+00 |
| CDC 6 Forze risultanti: | X= 0.000e+00 | Y= 0.000e+00 | Z= -3.582e+03 |
| CDC 6 Coppie risultanti: | X= -1.576e+06 | Y= 1.519e+06 | Z= 0.000e+00 |
| CDC dinamico 7 massa risultante = | 2.050e+05 | | |
| CDC dinamico 8 massa risultante = | 2.050e+05 | | |
| CDC dinamico 9 massa risultante = | 2.050e+05 | | |
| CDC dinamico 10 massa risultante = | 2.050e+05 | | |
| Scrittura file per analisi effettuata. | | | |

CALCOLO SFORZO NORMALE PILLASTRO

$$H_1 = 300 \text{ cm}$$

$$H_2 = 300 \text{ cm}$$

$$H_m = 3.60 \text{ cm}$$

$$L_{infy} = 150 \text{ cm}$$

$$L_{infx} = 244.5 \text{ cm}$$

$$A_T = 1200 \text{ cm}^2$$

$$A_p = 1225 \text{ cm}^2$$

$$P_{cls} = 0.0025 \text{ daN/cm}^3$$

$$P_{timp} = 0.0011 \text{ daN/cm}^3$$

$$S_{timp} = 30 \text{ cm}$$

combinazione "carica" S.L.E n° 79

$$N_{PT} = (G_{1K} + G_{2K} + \psi_2 Q_K)_{II} \cdot L_{infy} \cdot L_{infx} + (G_{1K} + G_{2K} + \psi_2 Q_K)_I \cdot L_{infy} \cdot L_{infx} \\ + P_{cls} [A_T \cdot (L_{infx} + L_{infy})] + P_{cls} \cdot A_p \cdot H_2 + P_{timp} \cdot S_{timp} \cdot H_2 \cdot L_{infy} \\ + P_{timp} \cdot S_{timp} \cdot H_m \cdot L_{infx} = 8861.7 \text{ daN}$$

$$N_{PP} = N_{PT} + P_{cls} \cdot A_p \cdot H_1 = 9780.45 \text{ daN}$$

solai interp.

$$G_{1K} = 0.045 \text{ daN/cm}^2$$

$$Q_{1K} = 0.01 \text{ "}$$

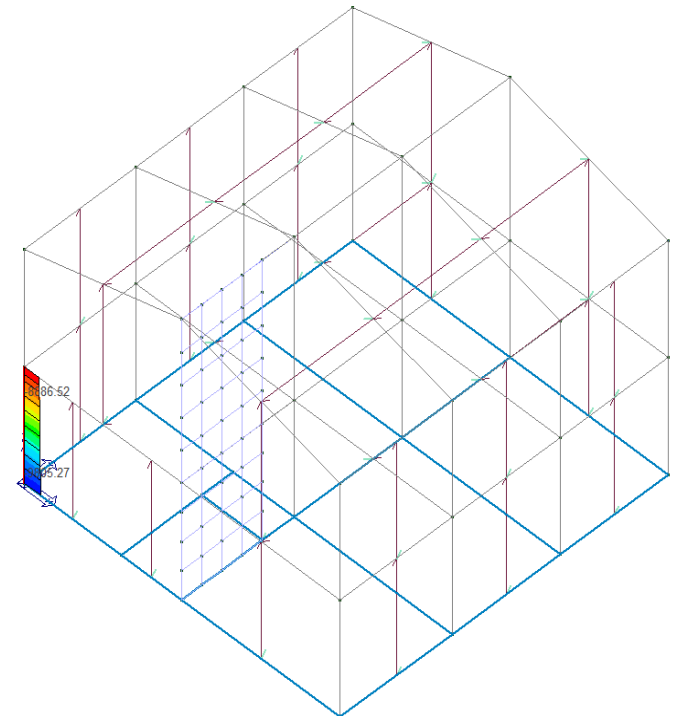
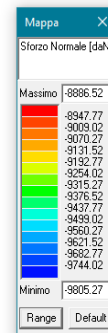
$$Q_{2K} = 0.02 \text{ " } \psi_2 = 0.3$$

solai copertura

$$G_{1K} = 0.05 \text{ daN/cm}^2$$

$$G_{2K} = 0.00 \text{ "}$$

$$Q_{1K} = 0.048 \text{ " } \psi_2 = 0$$



Calcolo di Accettabilità dei Risultati

| | Risultati Manuali | Risultati PRO_SAP | Errore [%] |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------|
| Peso Proprio Struttura [daN] | 163041 | 162000 | 0.64 |
| Peso Carichi Strutturali solai G_{1k} [daN] | 72273.52 | 72360 | 0.12 |
| Peso Carichi Non Strutturali solai G_{2k} [daN] | 7462.4 | 7462 | 0.005 |
| Peso Carichi Variabili solai Q_{sk} [daN] | 14924.8 | 14920 | 0.03 |
| Peso Carichi Neve solai Q_{nk} [daN] | 3581.95 | 3582 | 0.001 |
| Peso Carichi tamponatura G_{2k} [daN] | 71786.88 | 71510 | 0.38 |
| Massa [daN] | 205491 | 205000 | 0.23 |
| T_1 [s] | 0.33 | 0.336 | 1.9 |
| F_h [daN] | 13504 | 14383.48 | 6.31 |
| N_{pil} [daN] | 8861.7 | 8886.52 | 0.27 |
| Pressione Terreno [daN/cm²] | 0.54 | 0.54 | 0.00 |

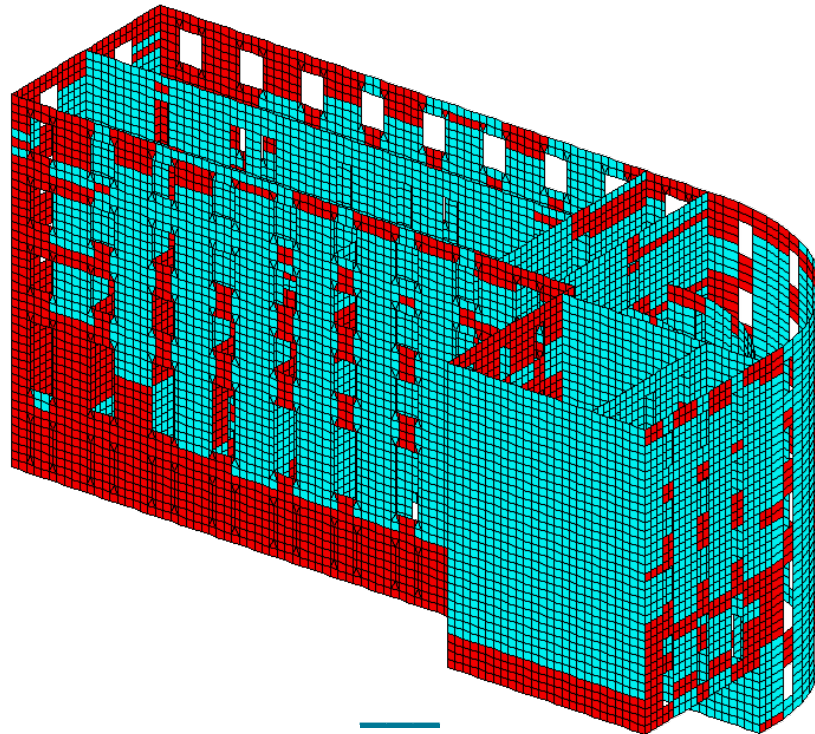
Verifiche automatiche

- Una volta che ci siamo assicurati che i risultati siano accettabili è possibile fare le verifiche automatiche.
- **PRO_SAP consente di personalizzare i criteri di progetto specificando, tra le altre cose, quali sono i maschi e quali sono le travi di accoppiamento.**

| Pareti c.a. | | Gusci c.a. | Travi c.a. | Pilastrini c.a. | Solai e pannelli | Aste acc. |
|-------------------------------------|---------------------------|------------|------------|----------------------------|------------------|-----------|
| Pilastrini acc. | | Travi acc. | | Muratura | Legno | XLAM |
| Lunghezze libere | | | | | | |
| Altezza interpiano | | | | 400.0 [cm] | | |
| Rho | | | | 0.85 | | |
| Snellezza limite | | | | 20.0 | | |
| Generalità | | | | | | |
| Gamma non sismico | | | | 2.0 | | |
| Gamma sismico | | | | 2.0 | | |
| Fattore di confidenza FC | | | | 1.35 | | |
| Tolleranza azioni | | | | 0.0 [daN/cm ²] | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Media valori per quota | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Media valori per elemento | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Verifica come fascia | | | | | |
| <input type="checkbox"/> | Usa formula [7.8.3] | | | | | |

Verifiche automatiche

- Nello stato di progetto PRO_SAP mostra in azzurro gli elementi verificati e in rosso gli elementi non verificati.
- Può capitare che un edificio esistente non risulti verificato per il **100%** dell'azione sismica di progetto prevista per gli edifici nuovi.
- Vediamo quali sono le verifiche automatiche e come operare



Verifiche automatiche: snellezza

La resistenza unitaria di progetto ridotta $f_{d,rid}$ riferita all'elemento strutturale si assume pari a

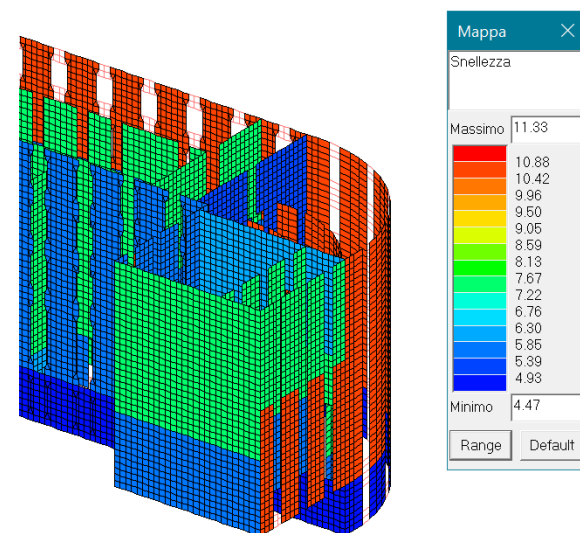
$$f_{d,rid} = \Phi f_d \quad [4.5.4]$$

in cui Φ è il coefficiente di riduzione della resistenza del materiale, riportato in Tab. 4.5.III in funzione della snellezza convenzionale λ e del coefficiente di eccentricità m definito più avanti (equazione [4.5.6]).

Per valori non contemplati in tabella è ammessa l'interpolazione lineare; in nessun caso sono ammesse estrapolazioni.

Tab. 4.5.III -Valori del coefficiente Φ con l'ipotesi della articolazione (a cerniera)

| Snellezza λ | Coefficiente di eccentricità $m = 6 e/t$ | | | | |
|---------------------|------------------------------------------|------|------|------|------|
| | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 0 | 1,00 | 0,74 | 0,59 | 0,44 | 0,33 |
| 5 | 0,97 | 0,71 | 0,55 | 0,39 | 0,27 |
| 10 | 0,86 | 0,61 | 0,45 | 0,27 | 0,16 |
| 15 | 0,69 | 0,48 | 0,32 | 0,17 | |
| 20 | 0,53 | 0,36 | 0,23 | | |



Verifiche automatiche: N-Mp

7.8.2.2 VERIFICHE DI SICUREZZA

7.8.2.2.1 Pressoflessione nel piano

La verifica a pressoflessione di una sezione di un elemento strutturale si esegue confrontando il momento agente di progetto con il momento ultimo resistente calcolato assumendo la muratura non reagente a trazione e un'opportuna distribuzione non lineare delle compressioni. Nel caso di una sezione rettangolare e diagramma delle compressioni rettangolare con valore della resistenza pari a $0.85 f_{d,r}$, tale momento ultimo può essere calcolato come:

$$M_u = \left(l^2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_0}{2} \right) \left(1 - \frac{\sigma_0}{0,85f_d} \right) \quad [7.8.2]$$

dove:

M_u è il momento corrispondente al collasso per pressoflessione;

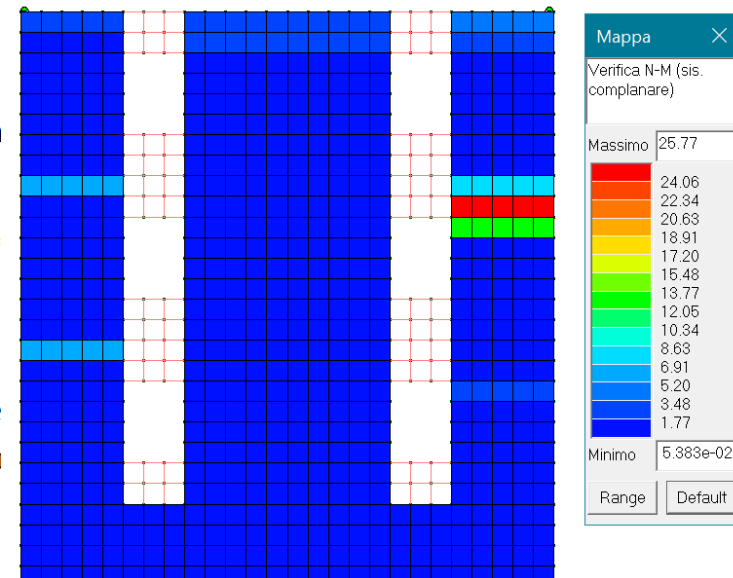
l è la lunghezza complessiva della parete (comprensiva della zona tesa

t è lo spessore della zona compressa della parete;

σ_0 è la tensione normale media, riferita all'area totale della sezione, σ_0 compressione); se N è di trazione, $M_u = 0$

$f_{d,r} = f_k / \gamma_M$ è la resistenza a compressione di progetto della muratura.

In caso di analisi statica non lineare, la capacità a pressoflessione può essere capacità a compressione della muratura e lo spostamento ultimo allo *SLC*, a me pari all'1,0% dell'altezza del pannello.



Verifiche automatiche: V

7.8.2.2.2 Taglio

La capacità a taglio di ciascun elemento strutturale è valutata per mezzo della relazione seguente:

$$V_t = l' \cdot t \cdot f_{vd} \quad [7.8.3]$$

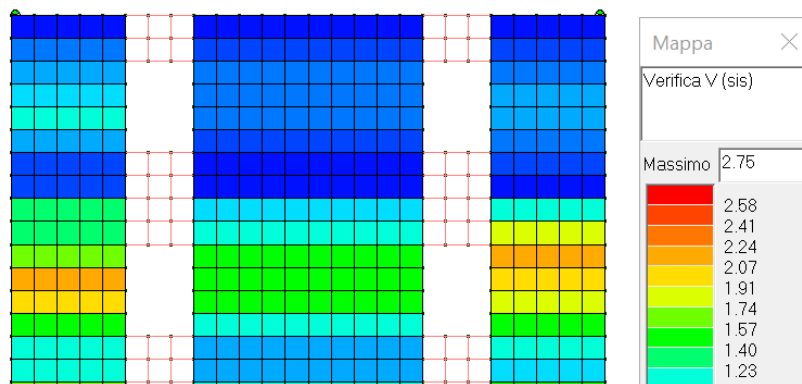
dove:

l' è la lunghezza della parte compressa della parete ottenuta sulla base di un diagramma lineare delle compressioni ed in assenza di resistenza a trazione;

t è lo spessore della parete;

$f_{vd} = f_{yk} / \gamma_M$ è definito al § 4.5.6.1 e al § 11.3.3, calcolando la tensione normale media (indicata con σ_n nei paragrafi citati) sulla parte compressa della sezione ($\sigma_n = N/(l' \cdot t)$).

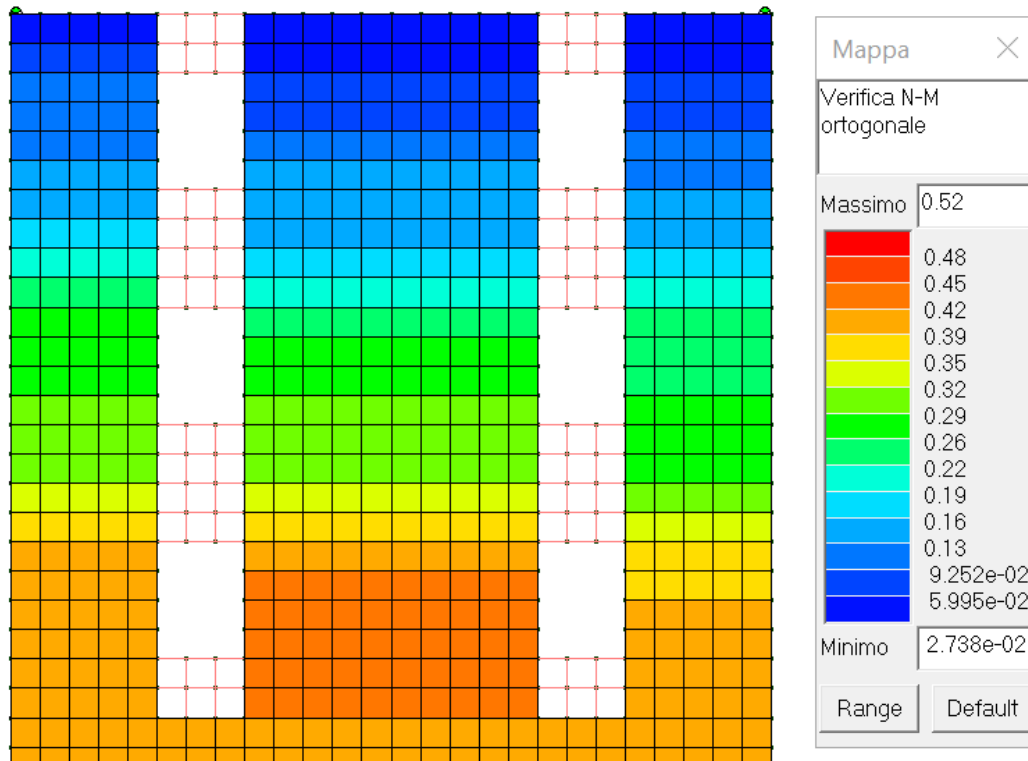
In caso di analisi statica non lineare, la resistenza a taglio può essere calcolata ponendo $f_{vd} = f_{vm0} + 0,4 \sigma_n \leq f_{y,lim}$ con f_{vm0} resistenza media a taglio della muratura (in assenza di determinazione diretta si può porre $f_{vm0} = f_{vk0}/0,7$ e $f_{y,lim} = f_{yk,lim} / 0,7$), e lo spostamento ultimo allo *SLC*, a meno di moti rigidi del pannello, può essere assunto pari allo 0,5% dell'altezza del pannello.



Verifiche automatiche: N-Mo

7.8.2.2.3 Pressoflessione fuori piano

Il valore del momento di collasso per azioni perpendicolari al piano della parete è calcolato assumendo un diagramma delle compressioni rettangolare, un valore della resistenza pari a $0,85 f_d$ e trascurando la resistenza a trazione della muratura. Per la verifica si può fare utile riferimento al 7.8.2.2.1.



Verifiche automatiche

7.8.2.2.4 Travi in muratura

La verifica di travi di accoppiamento in muratura ordinaria, in presenza di azione assiale orizzontale nota, viene effettuata in analogia a quanto previsto per i pannelli murari verticali. Qualora l'azione assiale non sia nota dal modello di calcolo (ad es. quando l'analisi è svolta su modelli a telaio con l'ipotesi di solai infinitamente rigidi nel piano), ma siano presenti, in prossimità della trave in muratura, elementi orizzontali dotati di resistenza a trazione (catene, cordoli), i valori delle resistenze possono essere assunti non superiori ai valori di seguito riportati ed associati ai meccanismi di rottura per taglio o per pressoflessione.

La capacità a taglio V_t di travi di accoppiamento in muratura ordinaria in presenza di un cordolo di piano o di un architrave resistente a flessione efficacemente ammorso alle estremità, può essere calcolata in modo semplificato come

$$V_t = h \cdot t \cdot f_{vd0} \quad [7.8.4]$$

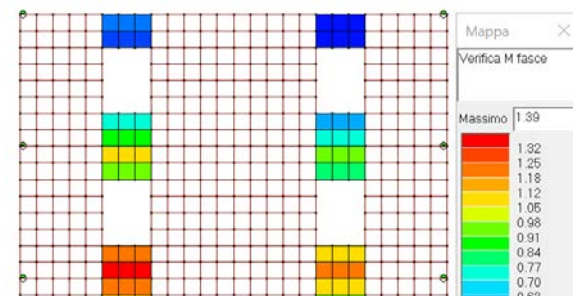
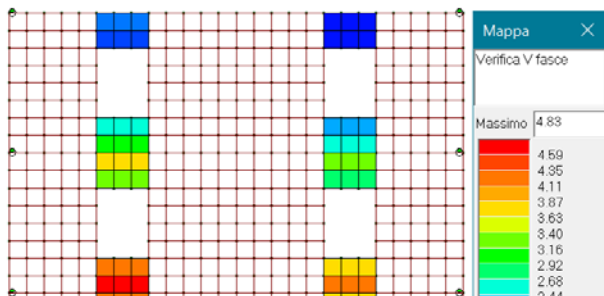
dove:

h è l'altezza della sezione della trave

$f_{vd0} = f_{vkd0} / \gamma_M$ è la resistenza di progetto a taglio in assenza di compressione; nel caso di analisi statica non lineare può essere posta pari al valore medio ($f_{vd0} = f_{vm0}$).

La capacità massima a flessione, associata al meccanismo di pressoflessione, sempre in presenza di elementi orizzontali resistenti a trazione in grado di equilibrare una compressione orizzontale nelle travi in muratura, può essere valutata come

$$M_u = H_p \cdot \frac{h}{2} \cdot \left[1 - \frac{H_p}{(0,85 \cdot f_{bd} \cdot h \cdot t)} \right] \quad [7.8.5]$$



Verifiche automatiche

- Anche i risultati della progettazione possono e devono essere controllati dal progettista.

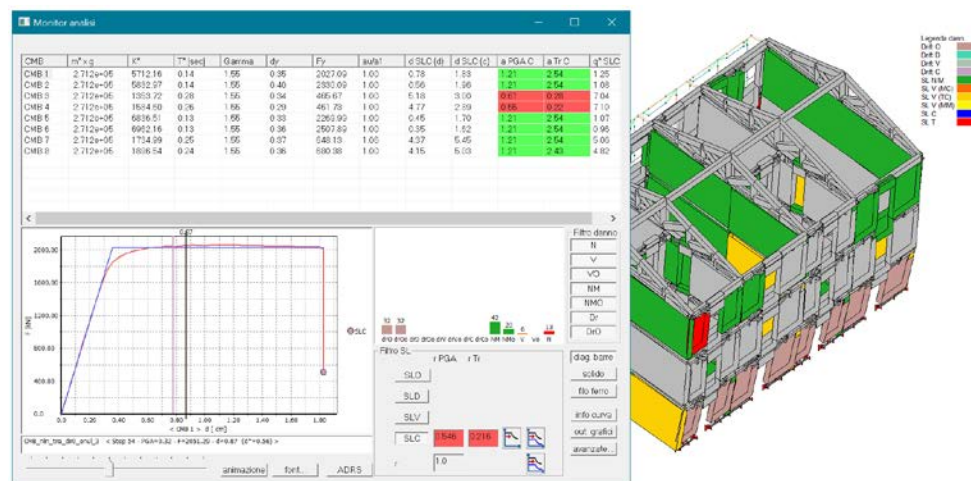


Verifiche automatiche: controlli

| Controllo | Metodo |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| snellezza | $\lambda = h_0/s$ dove $h_0 = \rho h$ |
| eccentricità | $e = M/N$ |
| Verifica a taglio | $V_t = I \cdot t \cdot f_{vd}$ |
| Verifica a pressoflessione | $M_u = \left(I^2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_0}{2} \right) \left(1 - \frac{\sigma_0}{0,85f_d} \right)$ |

Analisi statiche non lineari

- Le analisi di pushover su edifici in muratura forniscono come risultato una curva forza-spostamento
- Come fare calcoli manuali e considerare «accettabile» il risultato di una analisi di pushover?





ANDILWall DIVENTA



PRO_SAM

ANDIL in collaborazione con **2S.I.** presenta
la nuova soluzione per edifici in muratura

3

gli autori di eccellenza:
Prof. Magenes,
Ing. Manzini,
Ing. Morandi

+100

materiali in archivio
tra tipologie di mu-
ratura, di acciaio, di
legno e di cemento
armato

∞

infinite possibilità di
progettazione, veri-
fica e rinforzo di
strutture in muratura
e miste

Il modello

- Tipicamente le analisi statiche non lineari sono eseguite su modelli a telaio equivalente.

C8.7.1.3.1.1 Pareti murarie

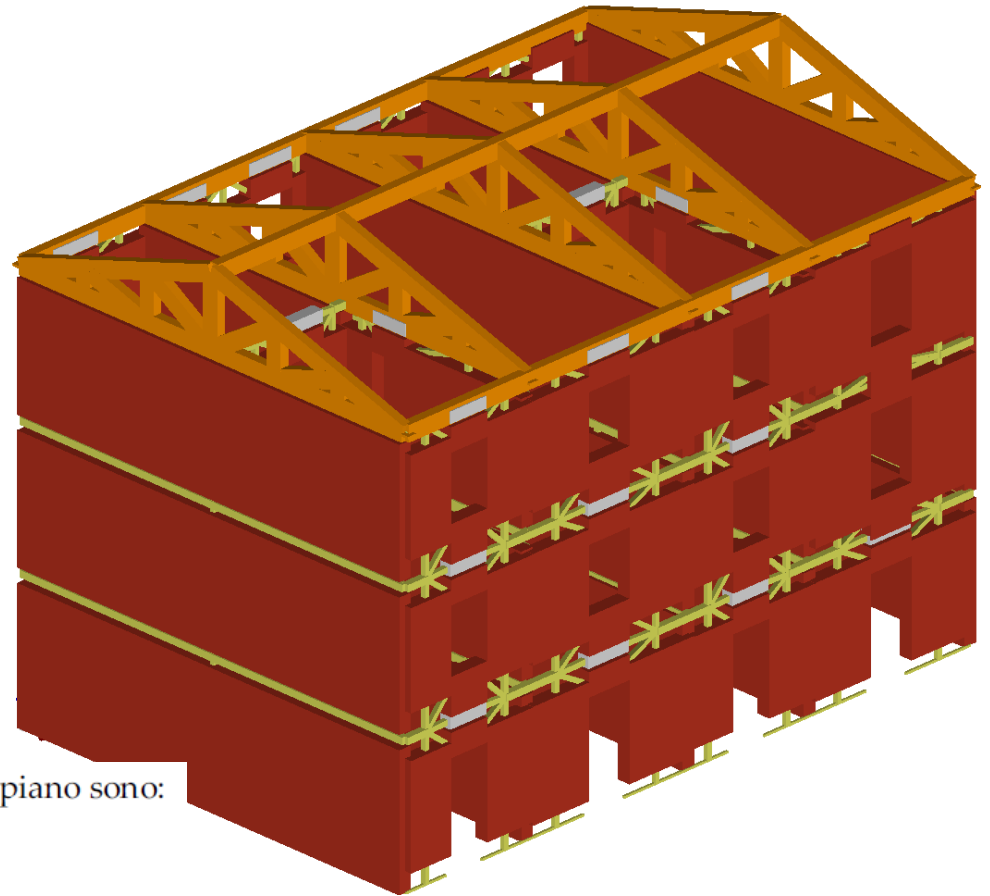
Nel caso di analisi elastica con il fattore q (analisi lineare statica ed analisi dinamica modale con fattore di comportamento), i valori di calcolo delle resistenze sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza e per il coefficiente parziale di sicurezza dei materiali (in accordo a quanto indicato al § C8.5); nel caso di analisi non lineare, i valori di calcolo delle resistenze sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza.

I modelli di capacità degli elementi in muratura sono differenziati in funzione della loro geometria, condizioni al contorno, ruolo strutturale e tipologia muraria. In alcune situazioni è possibile fare riferimento ad elementi maschio (ad asse verticale) ed elementi fascia (ad asse orizzontale), per i quali sono meglio note e più facilmente definibili le capacità in resistenza e in deformazione. Per questi elementi, nel caso di analisi non lineare, è possibile utilizzare un modello bilineare taglio-spostamento, in cui la resistenza è calcolata come la minore tra quelle relative ai diversi possibili meccanismi di rottura e la capacità di spostamento è valutata di conseguenza, attraverso una deformazione angolare limite di elemento.

Meccanismi di rottura

Nei maschi murari i principali meccanismi di rottura nel piano sono:

- pressoflessione;
- taglio-scorrimento;
- taglio con fessurazione diagonale.



Nelle fasce di piano i possibili meccanismi di rottura nel piano sono:

- pressoflessione;
- taglio con fessurazione diagonale.

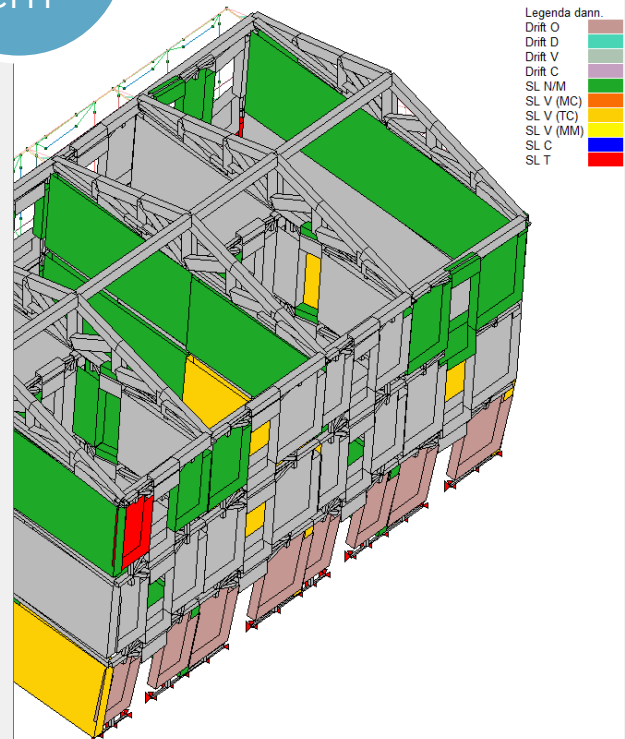
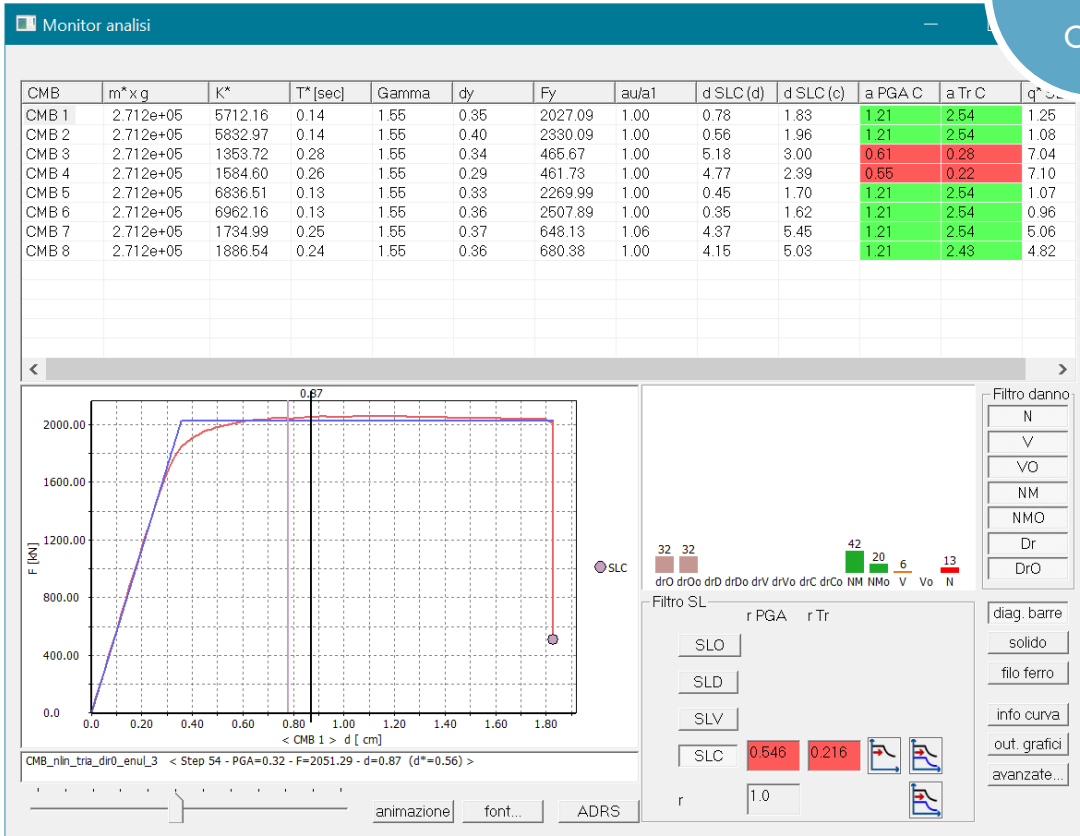
I controlli: la curva

Fmax
~ 2000
KN



Sono
accettabili?

dmax
~ 1,8
cm



I controlli: spostamento massimo

- In maniera molto semplificata si può valutare lo spostamento limite come

$$d = 0,002 \cdot H_{\text{tot}} = 0,002 \cdot 900 = 1,8 \text{ cm} \quad \checkmark$$

c) per costruzioni con struttura portante di muratura ordinaria

$$q d_r \leq 0,0020 \cdot h \quad [7.3.13]$$

Lo spostamento ultimo a SLC è valutato calcolando la deformazione angolare nelle due sezioni di estremità del pannello secondo la [C8.7.1.13], eventualmente assumendo che il punto di flesso sia a metà dell'elemento; la soglia limite è pari a 0,02, in presenza di elemento orizzontale resistente a trazione accoppiato alla fascia, 0,015 negli altri casi.

Lo spostamento ultimo a SLC è definito valutando la deformazione angolare rappresentativa come nel caso della rottura a taglio per trazione diagonale e assumendo per le tipologie murarie riportate in Tabella C8.5.I una soglia limite pari a 0,005. Nel caso invece di murature di tipologia moderna, ovvero costituite da blocchi forati, la soglia limite è pari a 0,004.

I controlli: Taglio massimo

Nel caso di muratura irregolare, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano del pannello può essere valutata con la relazione seguente:

$$V_t = l \cdot t \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} = l \cdot t \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}} \quad [\text{C8.7.1.16}]$$

dove:

l è la lunghezza del pannello

t è lo spessore del pannello

σ_0 è la tensione normale media, riferita all'area totale della sezione ($= P/lt$, con P forza assiale agente, positiva se di compressione)

f_{td} e τ_{0d} sono, rispettivamente, i valori di calcolo della resistenza a trazione per fessurazione diagonale e della corrispondente resistenza a taglio di riferimento della muratura ($f_t = 1,5 \tau_0$); nel caso in cui tale parametro sia desunto da prove di compressione diagonale, la resistenza a trazione per fessurazione diagonale f_t si assume pari al carico diagonale di rottura diviso per due volte la sezione media del pannello sperimentato valutata come $t(l+h)/2$, con t , l e h rispettivamente spessore, base e altezza del pannello.

b è un coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione, dipendente dalla snellezza della parete. Si può assumere $b = h/l$, comunque non superiore a 1,5 e non inferiore a 1, dove h è l'altezza del pannello.

I controlli: Taglio massimo

- $T_0=0,9$; $FC=1,2$

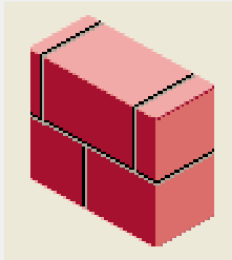
$$T_d = 0,9/1,2 = 0,75 \text{ daN/cm}^2$$

Tabella dei materiali

Definizione proprietà materiale tipo muratura

| | |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Stringa identificativa | Muratura in mattoni pieni e ... |
| Generalità | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Materiale esistente | |
| Fattore di confidenza FC m | 0.0 |
| Resistenze | |
| Resistenza fm | 24.0 [daN/cm ²] |
| Resistenza fhm | 12.0 [daN/cm ²] |
| Resistenza fv0m | 0.6 [daN/cm ²] |
| Resistenza fv0hm | 0.6 [daN/cm ²] |
| Resistenza tau0m | 0.9 [daN/cm ²] |
| Resistenza fvlimm | 3.12 [daN/cm ²] |
| <input type="checkbox"/> Elasto-plastico per aste n... | |
| <input type="checkbox"/> Muratura consolidata | |
| Proprietà | |
| Peso specifico | 1.8000e-03 [daN/cm ³] |
| Dilatazione termica | 1.0000e-05 [1/C] |
| Dilatazione termica 2 | 1.0000e-05 [1/C] |

Resistenza tau0m
Valore MEDIO della resistenza a taglio per fessurazione diagonale (ft=1.5*tau0) per [C8.7.1.16]

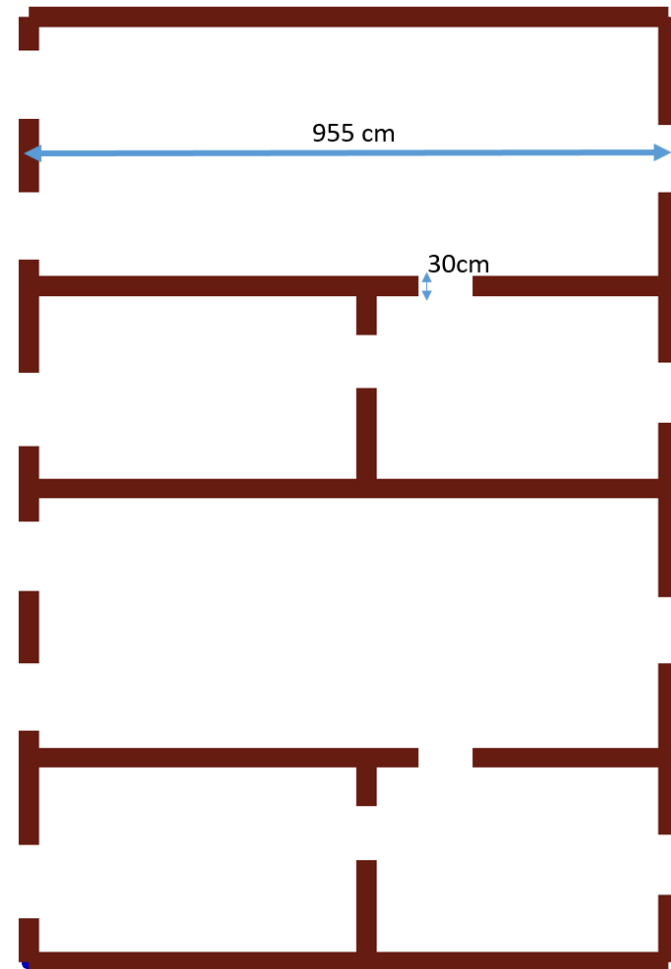


OK Annulla

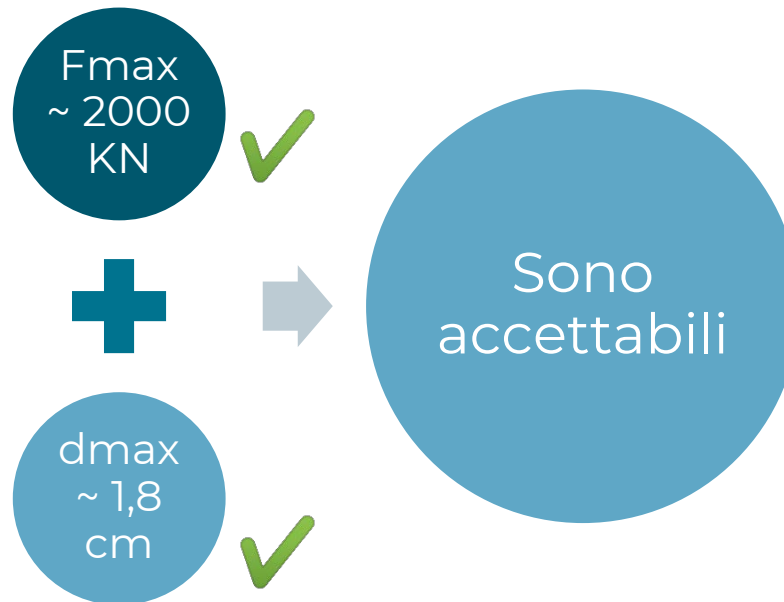
I controlli: Taglio massimo

$$V_t = l \cdot t \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}}$$

$$\begin{aligned} V_{tx} &\sim l_{tot} * t * (1,5 * \tau_{0d}) = \\ &= (955 * 5) * 30 * (1,5 * 0,75) = \\ &= 1611 \text{ daN} \quad \checkmark \end{aligned}$$



Analisi non lineari: controlli



| Controllo | Metodo |
|-------------|-------------------------------------------|
| Spostamento | 0,002 H _{tot} |
| Taglio | Formula semplificata di Turnšek e Cačovic |

CAPITOLO 10.**REDAZIONE DEI PROGETTI STRUTTURALI ESECUTIVI E DELLE RELAZIONI DI CALCOLO****10.1. CARATTERISTICHE GENERALI**

I progetti esecutivi riguardanti le strutture devono essere informati a caratteri di chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti e devono inoltre definire compiutamente l'intervento da realizzare.

Restano esclusi i piani operativi di cantiere ed i piani di approvvigionamento.

Il progetto deve comprendere i seguenti elaborati:

- Relazione di calcolo strutturale, comprensiva di una descrizione generale dell'opera e dei criteri generali di analisi e verifica;
- Relazione sui materiali;
- Elaborati grafici, particolari costruttivi;
- Piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera;
- Relazione sui risultati sperimentali corrispondenti alle indagini specialistiche ritenute necessarie alla realizzazione dell'opera.

Particolare cura andrà posta nello sviluppare le relazioni di calcolo, con riferimento alle analisi svolte con l'ausilio del calcolo automatico, sia ai fini di facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli, sia ai fini di consentire elaborazioni indipendenti da parte di soggetti diversi dal redattore del documento.

Il progettista resta comunque responsabile dell'intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l'ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.

10.2. ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista, dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso la documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

10.2.1. RELAZIONE DI CALCOLO

Il progettista dovrà avere cura che nella Relazione di calcolo la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

Tipo di analisi svolta

Occorre preliminarmente:

- dichiarare il tipo di analisi strutturale condotta (di tipo statico o dinamico, lineare o non lineare) e le sue motivazioni;
- indicare il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale e le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni.
- indicare chiaramente le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti. In ogni caso va motivato l'impiego delle combinazioni o dei percorsi di carico adottati, in specie con riguardo alla effettiva esauritività delle configurazioni studiate per la struttura in esame.

Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo

Occorre indicare con precisione l'origine e le caratteristiche dei codici di calcolo utilizzati riportando titolo, autore, produttore, versione, estremi della licenza d'uso o di altra forma di autorizzazione all'uso.

Modalità di presentazione dei risultati.

La quantità di informazioni che usualmente accompagna l'utilizzo di procedure di calcolo automatico richiede un'attenzione particolare alle modalità di presentazione dei risultati, in modo che questi riassumano, in una sintesi completa ed efficace, il comportamento della struttura per quel particolare tipo di analisi sviluppata. In particolare, è necessario che la Relazione di calcolo riporti almeno le seguenti indicazioni:

- descrizione dell'opera e della tipologia strutturale;
- inquadramento normativo dell'intervento;
- definizione dei parametri di progetto;

- descrizione dei materiali adottati e loro caratteristiche meccaniche;
- criteri di progettazione e modellazione;
- combinazioni delle azioni;
- codice di calcolo impiegato;
- rispetto delle verifiche per gli stati limite considerati.

L'esito di ogni elaborazione deve essere sintetizzato in disegni e schemi grafici contenenti, almeno per le parti più sollecitate della struttura, le configurazioni deformate, la rappresentazione grafica delle principali caratteristiche di sollecitazione o delle componenti degli sforzi, i diagrammi di involuppo associati alle combinazioni dei carichi considerate, gli schemi grafici con la rappresentazione dei carichi applicati e delle corrispondenti reazioni vincolari.

Di tali grandezze, unitamente ai diagrammi ed agli schemi grafici, vanno chiaramente evidenziati le convenzioni sui segni, i valori numerici e le unità di misura di questi nei punti o nelle sezioni significative ai fini della valutazione del comportamento complessivo della struttura, i valori numerici necessari ai fini delle verifiche di misura della sicurezza.

E' opportuno che i tabulati generalmente forniti dai programmi automatici, cui la Relazione di calcolo deve fare riferimento, non facciano parte integrante della Relazione stessa, ma ne costituiscano un allegato.

Informazioni generali sull'elaborazione.

A valle dell'esposizione dei risultati vanno riportate anche informazioni generali riguardanti l'esame ed i controlli svolti sui risultati ed una valutazione complessiva dell'elaborazione dal punto di vista del corretto comportamento del modello.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.

Spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con riferimento a schemi o soluzioni noti e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc.

10.2.2. VALUTAZIONE INDIPENDENTE DEL CALCOLO

Nel caso in cui si renda necessaria una valutazione indipendente del calcolo strutturale o comunque nel caso di opere di particolare importanza, i calcoli più importanti devono essere eseguiti nuovamente da soggetto diverso da quello originario mediante programmi di calcolo diversi da quelli usati originariamente e ciò al fine di eseguire un effettivo controllo incrociato sui risultati delle elaborazioni.



Descrizioni, schemi, ecc.

Controlli svolti

Accettabilità dei risultati

Il progettista e il software



- È quasi inevitabile ricorrere ad un software di calcolo strutturale per il progetto o la verifica
- Il progettista deve partire dalla conoscenza del fabbricato e dei materiali
- Il software deve consentire di scegliere tra tutte le tecnologie previste dalla normativa
- Il software deve documentare le formulazioni implementate
- Il progettista deve infine controllare i risultati forniti dal software per il “giudizio motivato di accettabilità dei risultati” [Par. 10.2.1, NTC 2018]

Rinnovo i ringraziamenti all'Ing. Gilberto Dallavalle – Studio Ceccoli e associati per l'autorizzazione ad usare il modello e i calcoli di controllo dei risultati.

Grazie per l'attenzione!

Ing. Gennj Venturini



venturini@2si.it

www.2si.it