CAPITOLO 6

MURATURE

INDICE

6.1 INTRODUZIONE 3

6.2 SCHEMATIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELL'EDIFICIO 3

6.3 MODELLAZIONE 7

6.3.1 INTERPIANI 8
6.3.2 APERTURE 10
6.3.3 STRATEGIE DI COSTRUZIONE DELLA SCATOLA MURARIA 11

6.3.4 CREAZIONE MODELLO 12

6.3.4.1. GENERAZIONE DEL TELAIO EQUIVALENTE 12
6.3.4.2 MODIFICHE AL MODELLO 13
6.3.4.3 COMPLETAMENTO DEL MODELLO E CALCOLO 13

6.4 ANALISI DEL MODELLO E VERIFICHE LINEARI 14

6.4.1 LE IMPOSTAZIONI DI VERIFICA 14
6.4.2 UN PRIMO CONTROLLO: LE TRAZIONI 15
6.4.3.LE VERIFICHE LINEARI 16
6.4.3.1. PRESSOFLESSIONE NEL PIANO 16
6.4.3.2 TAGLIO NEL PIANO 16
6.4.3.3 PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO 17
6.4.3.4 SISMICA LOCALE 17
4.3.5. VERIFICA DELLE FASCE DI PIANO 17
6.4.4.COME CONSULTARE I RISULTATI DELLE VERIFICHE LINEARI 17
6.4.5 L'ANALISI LINEARE CON REDISTRIBUZIONE: I COMANDI DI INCREMENTO DELLO SVINCOLO 19

6.5 L'ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER) 20

6.6 I RINFORZI 23

6.6.1.LE RETI ELETTROSALDATE O IN MATERIALI COMPOSITI 23
6.6.2. I RINFORZI IN TESSUTI MONODIREZIONALI IN FRP 24
6.6.3 L' APPLICAZIONI DEI RINFORZI 26

6.7 I MODELLI A GUSCIO 27

6.1 INTRODUZIONE

Le murature portanti presentano, a causa della loro natura intrinseca di materiale composito, anisotropo, non linearmente elastico e molto spesso già esistente, un comportamento non facilmente schematizzabile dal punto di vista meccanico.

Negli ultimi venti anni sono stati sviluppati numerosi studi per il calcolo della risposta sismica nell'ambito della modellazione delle strutture in muratura, aventi diversi presupposti teorici e differente livello di dettaglio, proprio a causa della gran varietà di opere murarie. Queste differiscono anche notevolmente, per tessitura, per materiali impiegati, per dettagli strutturali e per concezione d'insieme.

DOLMEN, nell'offrire gli strumenti per il calcolo di questa tipologia strutturale, ha scelto la modellazione a **telaio equivalente** in linea con le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 [NTC08 7.8.1.5.2].

In DOLMEN è presente anche la possibilità di modellare e verificare elementi di dettaglio tramite i gusci.

Le murature sono completamente gestite e verificate all'interno del **CAD 3D Struttura** attraverso il menù "Murature".

L'Input dell'utente consiste nella creazione della "scatola muraria" attraverso entità chiamate "**Interpiano**", rappresentative del tratto di una parete compreso fra due orizzontamenti, con assegnate proprietà di geometria, spessore e materiale: in questi interpiani vanno poi inseriti gli oggetti "**Apertura**", gestiti tramite le corrispondenti schede tipologiche, come ogni altro oggetto dell'ambiente tridimensionale: gli interpiani, insieme alle aperture in essi praticate, sono traslabili e copiabili al pari degli altri oggetti strutturali. Con la funzione "Genera modello" si richiede al programma di dedurre da questo input la geometria e le sezioni del telaio equivalente: esso si compone di elementi asta, generati però con ben precise proprietà di svincolo interno e estremi rigidi, secondo un metodo collaudato per tener conto delle particolarità delle strutture murarie (sono reperibili indicazioni di dettaglio nelle pubblicazioni edite dal CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti).

NB: Per i dettagli sui singoli comandi consultare l'Help contestuale del CAD 3D struttura.

6.2 SCHEMATIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELL'EDIFICIO

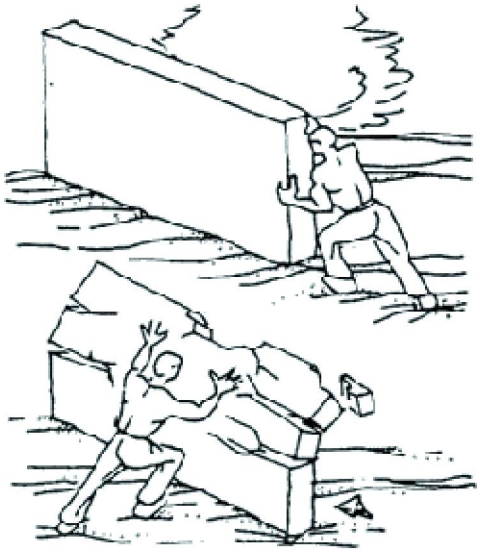
L'edificio a muratura portante deve essere concepito come una **struttura tridimensionale**.

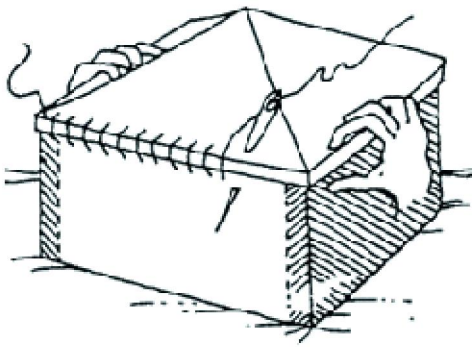
I sistemi resistenti di pareti in muratura, gli orizzontamenti e le fondazioni devono essere collegati tra di loro in modo da resistere alle azioni.

Ai fini di un adeguato comportamento statico e dinamico dell'edificio i pannelli murari devono svolgere funzione portante, se sollecitati prevalentemente da azioni verticali, e svolgere funzione di controvento, se sollecitati prevalentemente da azioni orizzontali. La resistenza delle pareti a forze agenti nel loro piano è molto maggiore rispetto alla resistenza alle forze a esse ortogonali.

L'organizzazione dell'intera struttura, l'interazione e il collegamento fra le sue parti devono assicurare un comportamento d'insieme di tipo scatolare. La Norma richiede, quindi, che resistenza

e stabilità della struttura siano garantite da un comportamento d'insieme, nel quale ogni parete ha il compito specifico di resistere alle azioni nel proprio piano.

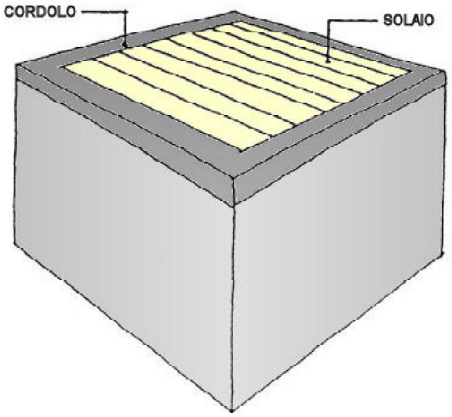




Un edificio in muratura è una struttura complessa in cui tutti gli elementi cooperano nel resistere ai carichi applicati: la complessità del comportamento reale di tali strutture porta spesso a svolgere il progetto e l'analisi strutturale introducendo notevoli semplificazioni. Se la geometria della parete e delle aperture è sufficientemente regolare, è possibile modellare una parete muraria tramite un **telaio equivalente**.

Nel modello strutturale a telaio equivalente le pareti vengono schematizzate tramite aste svincolate relativamente ai momenti perpendicolari al loro piano.

La capacità dei pannelli murari di resistere alle azioni orizzontali è favorevolmente influenzata dalla presenza di forze verticali stabilizzanti. Sono considerati resistenti alle azioni orizzontali quando hanno una lunghezza non inferiore a 0,3 volte l'altezza di interpiano; eventuali pannelli murari aventi la base inferiore al 30% dell'altezza verranno schematizzati come bielle. Le pareti saranno comunque verificate anche per le azioni perpendicolari al loro piano, alle quali rispondono come elementi secondari.

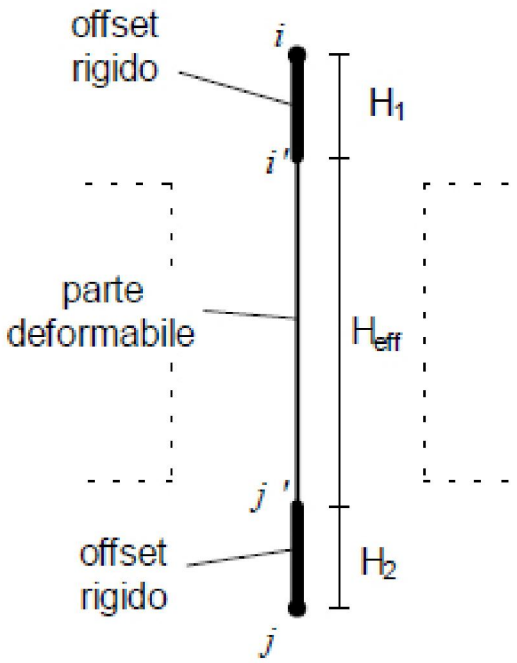


I solai saranno considerati come elementi che ripartiscono le azioni tra i muri.

I muri portanti e di controventamento e i solai devono essere efficacemente collegati tra loro; tale collegamento può essere realizzato mediante cordoli continui in cemento armato lungo tutti i muri, all'altezza dei solai di piano e di copertura.

La formulazione a telaio equivalente può sembrare semplicistica, ma si è rivelata molto efficace e ha il vantaggio di essere nata dall'elaborazione e dallo sviluppo di alcuni concetti presenti nei metodi basati sul "meccanismo di piano", da tempo familiari a molti progettisti: inoltre, le

incertezze sui parametri di flessibilità e resistenza del materiale sono tali che è preferibile utilizzare un modello semplice e maneggevole, piuttosto che schematizzazioni analiticamente più sofisticate.

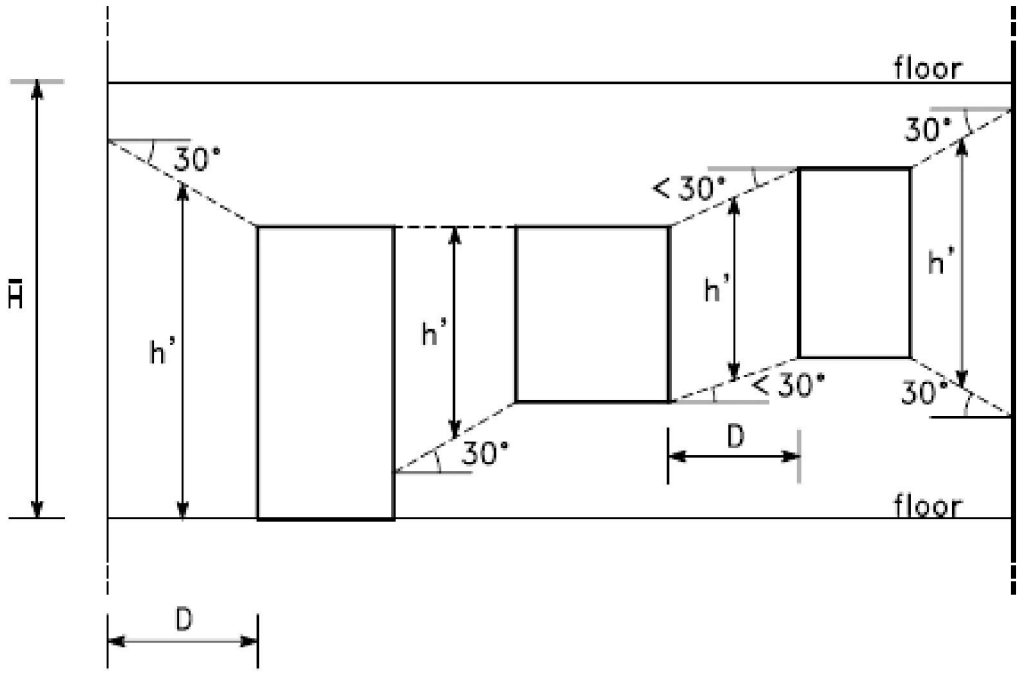


Il telaio equivalente deve rappresentare la scatola muraria. Gli elementi di cui è composto sono quindi generati con ben precise proprietà di svincolo interno e di estremi rigidi.

Si suppone, infatti, che un elemento sia costituito da una parte deformabile con resistenza finita, ed eventualmente, in presenza di aperture nella parete, di una o due parti infinitamente rigide e resistenti alle estremità dell'elemento (vedi figura a lato).

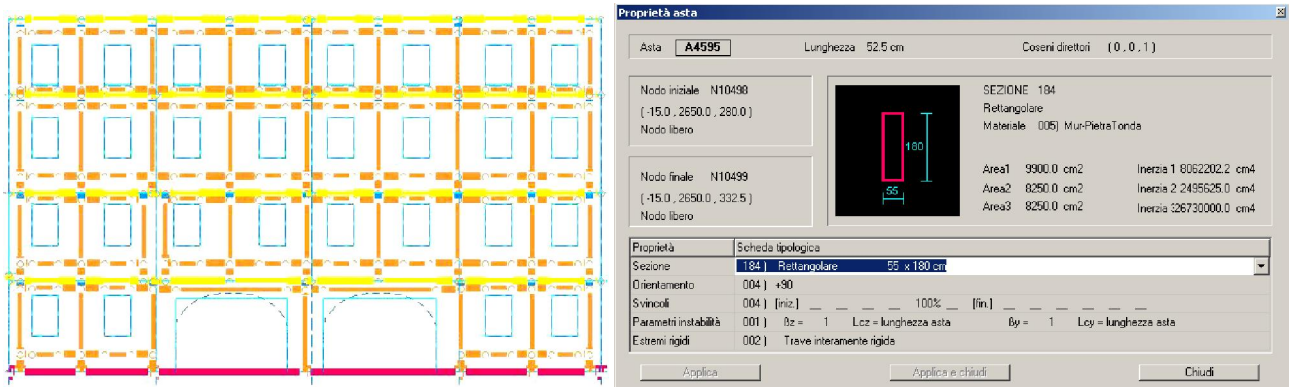
Le proprietà di svincolo interno e, a titolo esemplificativo, le dimensioni degli estremi rigidi, vengono determinate sulla base delle indicazioni contenute nel testo: "**Metodi semplificati per l'analisi sismica non lineare di edifici in muratura**" (G. Magenes, D. Bolognini, C. Braggio), scaricabile da gndt.ingv.it.

L'altezza della parte deformabile o "altezza efficace" dell'asta viene definita secondo quanto proposto da Dolce nel 1989 (vedi figura seguente), per tenere conto in modo approssimato della deformabilità della muratura nelle zone di nodo.



$$H_{eff} = h' + \frac{1}{3} D(\overline{H} - h')/h' \qquad \overline{H} = \text{altezza interpiano}$$

In DOLMEN, la generazione di questo modello avviene in modo automatico sulla base delle descrizioni fornite dall'utilizzatore; ciò che ne risulta è una schematizzazione piuttosto semplice e comprensibile, in quanto si compone di elementi usuali, le aste, il cui comportamento è facilmente interpretabile.



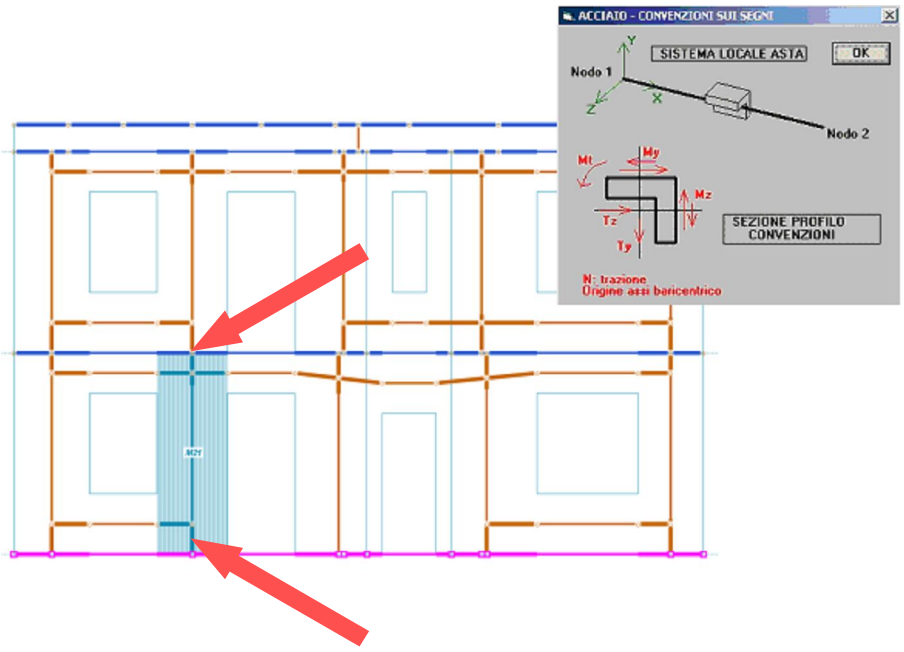
Tali aste rappresentano elementi maschio, se ad asse verticale, elementi fascia, se ad asse orizzontale.

Il maschio murario nasce completamente svincolato alle sue estremità relativamente ai momenti fuori piano, ovvero, secondo le convenzioni di DOLMEN, relativamente ai momenti M_{yy}.

Svincoli aggiuntivi vengono inseriti anche nel caso di pannelli particolarmente snelli, come richiesto dalle NTC 2008. Per tener conto di ciò, infatti, vengono inseriti ulteriori svincoli al momento per azioni nel piano, in modo da far sì che il pannello si limiti semplicemente a trasmettere carichi verticali.

Un modello così creato è, per sua natura, facilmente modificabile e completabile dal progettista, ad esempio con l'inserimento di altri elementi quali travi in acciaio, solai, travi in cls, tiranti, fondazioni alla Winkler, ecc. Dal momento in cui il modello viene creato, e fino al momento della sua verifica, le aste di cui si compone sono a tutti gli effetti oggetti strutturali dell'ambiente CAD 3D struttura al pari degli altri e come tali caricabili, vincolabili, ecc.

In analogia poi a quanto avviene per le carpenterie, dove un insieme di aste viene ricordato dal programma come "trave", per essere consegnato al programma "Trave Continua", anche in questo caso un insieme di aste viene ricordato dal programma come costituente un elemento "Maschio murario" o "Fascia di piano" e come tale suscettibile delle verifiche del modulo "murature".



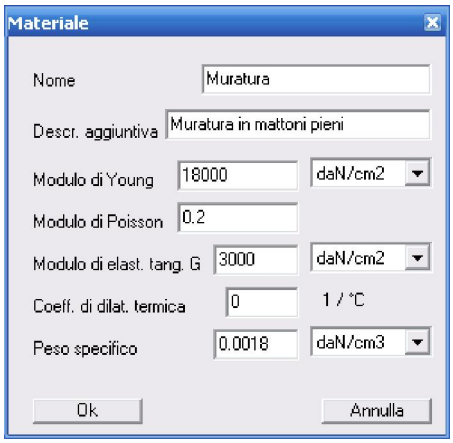
6.3 MODELLAZIONE

Per poter eseguire la modellazione della struttura in muratura attraverso *interpiani* e *aperture* occorre prima definire i seguenti parametri:

- caratteristiche del materiale muratura
- resistenza del materiale murature
- sezione del cordolo

- caratteristiche del materiale Muratura:

[COMANDO: *Struttura → schede materiali*]



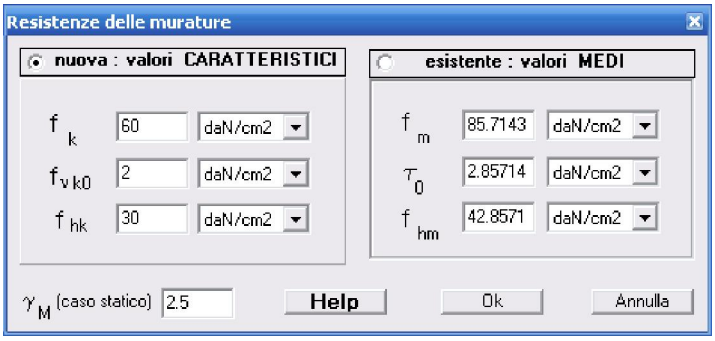
Descrizione: variabile alfanumerica di non più di 20 caratteri.

Moduli E, ν, G: Caratteristiche elastiche del materiale.

Coeff. dilataz: Coefficiente di dilatazione termica.

Peso specifico: Peso specifico del materiale, che verrà utilizzato nel calcolo del peso proprio.

- resistenza del materiale Muratura:



[COMANDO: *Murature → schede resistenze*]

Si richiede di specificare se la muratura in oggetto è nuova o esistente. A seconda che la muratura da verificare sia nuova o esistente, i valori disponibili come dati di resistenza saranno quelli caratteristici o quelli medi e di conseguenza, sarà attivo l'uno o l'altro pannello di input dati.

I valori da assegnare come valori caratteristici sono:

f_k: resistenza caratteristica a compressione della muratura, in direzione verticale;

f_{vk0}: resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali;

f_{hk}: resistenza caratteristica a compressione della muratura, in direzione orizzontale, utilizzata in fase di verifica delle fasce di piano;

I valori da assegnare come valori medi sono:

f_m: resistenza media a compressione della muratura, in direzione verticale;

τ_0: resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali;

f_{hm}: resistenza media a compressione della muratura, in direzione orizzontale, utilizzata in fase di verifica delle fasce di piano;

La Norma non fornisce tabelle né indicazioni di massima relative al parametro f_{hk}, necessario ai fini della verifica delle fasce di piano. Qualche idea ci viene fornita dalle "*Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a. , c.a.p. e murarie mediante FRP*", al punto 4.2.3, dove si consiglia di utilizzare come valore orientativo della resistenza a compressione orizzontale, il 50% della resistenza a compressione verticale.

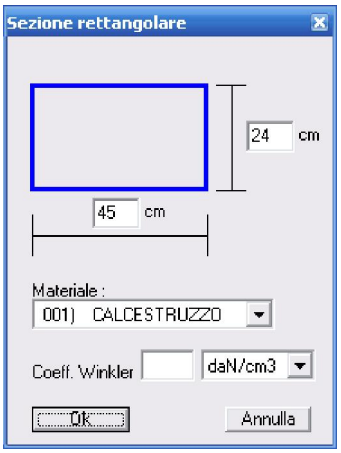
Per semplicità, DOLMEN valuta i valori caratteristici come il corrispondente valore medio moltiplicato 0.7:

Inoltre, γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza sulla resistenza del materiale muratura, da utilizzarsi nelle verifiche dei casi non sismici. Nella verifiche dei casi sismici, il valore del coefficiente parziale di sicurezza è imposto dalla normativa pari a 2 [7.8.1.1]

- sezione del cordolo:

[COMANDO: *Struttura → aste → gestione sezioni → schede sezioni*]

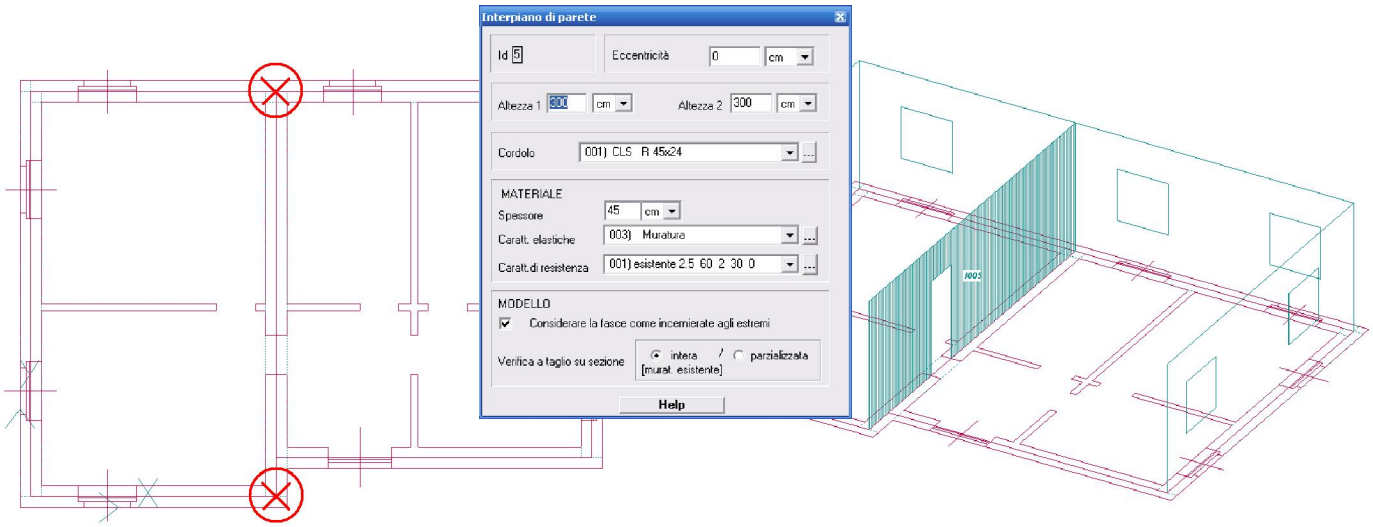
La presenza del cordolo è necessaria per poter collegare tra loro e caricare le aste del modello a telaio equivalente; quindi nel caso non fosse presente il cordolo potrà essere semplicemente una sezione di larghezza pari all'interpiano alta 1 cm, nello stesso materiale costituente l'interpiano.



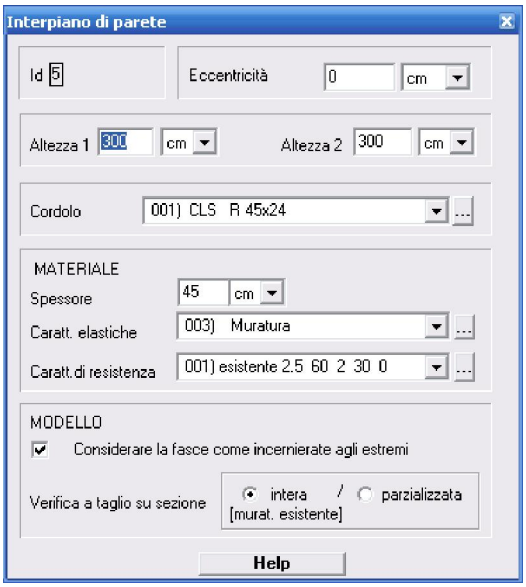
6.3.1 INTERPIANI

Mediante l'**Interpiano di parete** l'utente descrive al programma la scatola muraria; l'oggetto "Interpiano di parete" costituisce cioè la base per la successiva generazione del modello a telaio, e rappresenta un tratto omogeneo (in caratteristiche materiale, spessore, etc.) di una parete compreso tra due orizzontamenti, di altezza anche linearmente variabile; l'interpiano rappresenta cioè il piano medio del tratto di parete. Se sono presenti pareti incidenti o ortogonali internamente a un tratto omogeneo fra due orizzontamenti, queste non suddividono il tratto omogeneo in più interpiani.

N.B.: I comandi del sottomenù "Interpiani" e quelli del sottomenù "Aperture" risultano particolarmente comodi da utilizzare avendo posto in una vista piana una pianta del piano che si sta schematizzando).



La creazione dell'interpiano avviene semplicemente cliccando 2 punti in pianta ([COMANDO: *Murature→Interpiani→Nuovo*]): all'interpiano vengono attribuite le proprietà visibili nel pannello nel momento in cui viene cliccato il secondo punto.



Id: numero identificativo dell'interpiano: non è un dato, ma è generato in automatico dal programma.

Eccentricità: del piano medio dell'interpiano rispetto all'interpiano di base (che avrà ovviamente eccentricità nulla): è anche possibile non assegnare l'eccentricità in modo numerico, bensì tramite il comando "Interpiani > Allinea", più comodo.

Altezza 1 e Altezza 2: altezze in corrispondenza del 1° e del 2° punto. Possono essere diverse nel caso di pareti con bordo superiore obliquo.

Cordolo: è la sezione che il programma dovrà assegnare al cordolo in c.a sul lato superiore del muro

Caratteristiche elastiche: scelte come scheda materiali (definite alla voce "*Struttura > Schede materiali*")

Caratteristiche di resistenza: scelte come scheda resistenze (definite alla voce Murature> Schede resistenze") necessarie per effettuare le successive verifiche: il modello complessivo potrà essere quindi composto sia da interpiani in muratura esistente che da interpiani in muratura nuova.

All'utente è inoltre richiesto di scegliere se generare le aste rappresentative delle fasce di piano come incernierate agli estremi: il modello generato in automatico è comunque successivamente modificabile.

Il tipo di verifica a taglio per i pannelli murari appartenenti all'interpiano dipende da come è stata definita la muratura in quanto a caratteristiche di resistenza: se nuova, la verifica può essere

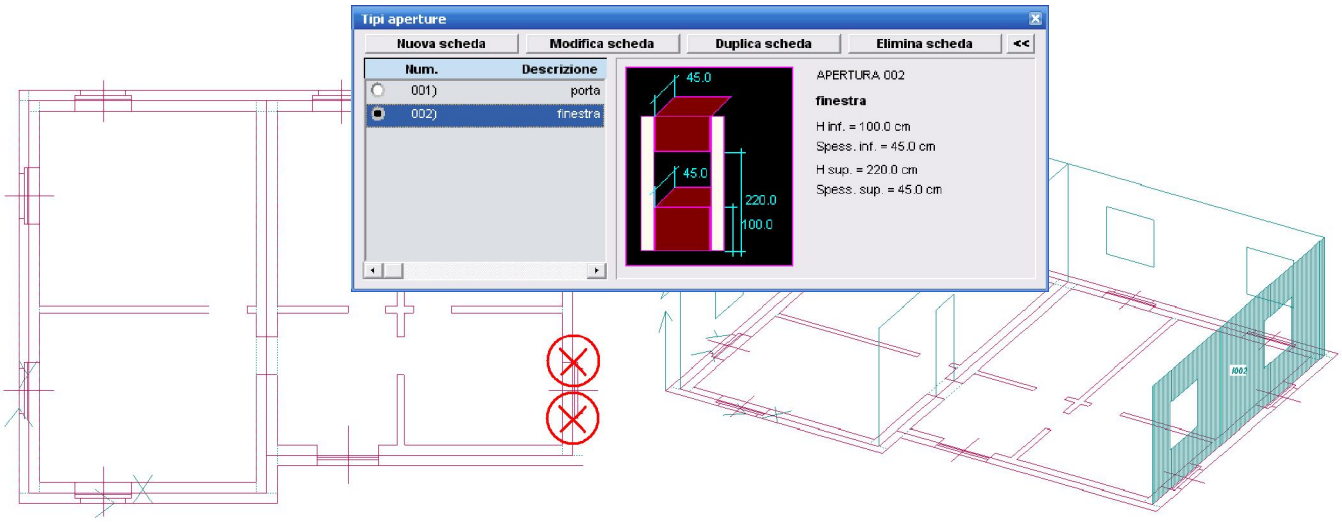
eseguita solo sulla sezione parzializzata [NTC08:7.8.3.2.2]: se esistente, è possibile richiedere la verifica o con la formula relativa alla sezione parzializzata o con la formula relativa alla sezione intera [Circolare NTC08: C8.7.1.5].

6.3.2 APERTURE

L'oggetto **apertura** permette di definire all'interno di un interpiano le porzioni di "vuoto" di quest'ultimo.

Si possono creare diverse tipologie di aperture e queste vengono inserite negli interpiani tramite la selezione in pianta dei vertici di base del "foro" ([COMANDO: *Murature→Aperture→Inserisci schede aperture*]).

Nel definire una tipologia di apertura, ponendo nullo uno degli spessori il tratto di muro corrispondente viene eliminato: se ambedue gli spessori sono nulli, l'apertura costituisce un tratto verticale completamente vuoto.



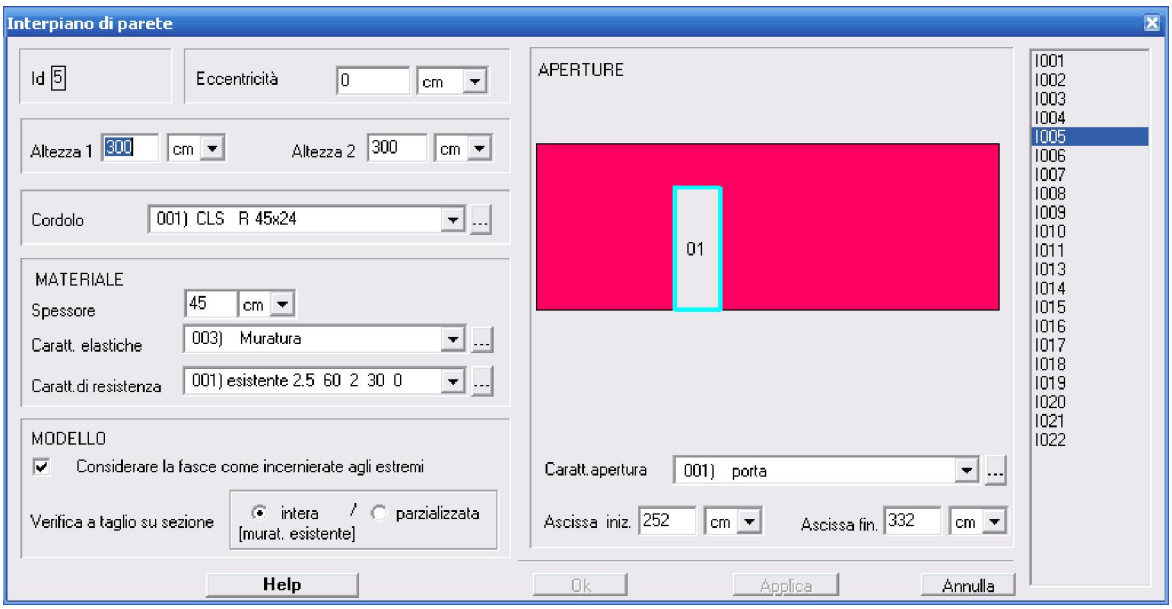
6.3.3 STRATEGIE DI COSTRUZIONE DELLA SCATOLA MURARIA

Questa fase di descrizione della scatola muraria, per quanto possa apparire una fase di mero disegno, è tuttavia quella che definisce poi la successiva geometria del modello strutturale.

È bene quindi seguire alcuni utili accorgimenti, che rendono oltretutto più semplice e veloce questa fase:

- il modello deve essere il più possibile semplificato ed "idealizzato": è bene non prendere ad esempio in considerazione differenze di spessore che potrebbero essere dell'ordine di grandezza dell' errore di misura del rilievo, e analogamente trascurare spezzoni di muratura avente solo funzione di mazzetta per porte. Questo accorgimento velocizzerà la creazione del modello evitando inoltre di introdurre elementi di improbabile verifica.
- nel generare interpiani sovrapposti uguali o simili, conviene generarli per traslazione di un interpiano base, e poi eventualmente modificare le aperture nell'interpiano o negli interpiani cosi generati; ciò consente di evitare piccoli disassamenti delle aperture che potrebbero non essere ben interpretate in fase di generazione del modello.
- non è necessario suddividere in due diversi interpiani di uguali proprietà un interpiano in corrispondenza di un altro interpiano ad esso incidente, in quando otterrei semplicemente una riduzione delle caratteristiche di resistenza della parete: la trasmissione degli sforzi fra gli interpiani avviene solamente a livello del cordolo, là ove è la "cucitura" della scatola muraria, per cui una simile suddivisione non è necessaria, oltre a ridurre le resistenze complessive.
- al termine quindi della fase di assegnazione della scatola muraria, e prima di procedere oltre, è bene utilizzare il comando "*File → Check DB*", che provvederà a segnalare quanto al programma appare sospetto o non ottimale ai fini della corretta modellazione della struttura.

DOLMEN fornisce all'interno del sottomenù "*Murature → Interpiani*" comandi di modifica degli oggetti fin qui generati: ad esempio i comandi "*Murature → Interpiani → Unisci uguali*" o "*Unifica*" o "*Modifica spessore*", o, più in generale "*Murature → Interpiani → Edita proprietà*" che apre un pannello nel quale posso modificare spessore e altezze dell'interpiano selezionato, le schede scelte per resistenze, sezione cordolo, tipo e posizione delle aperture.

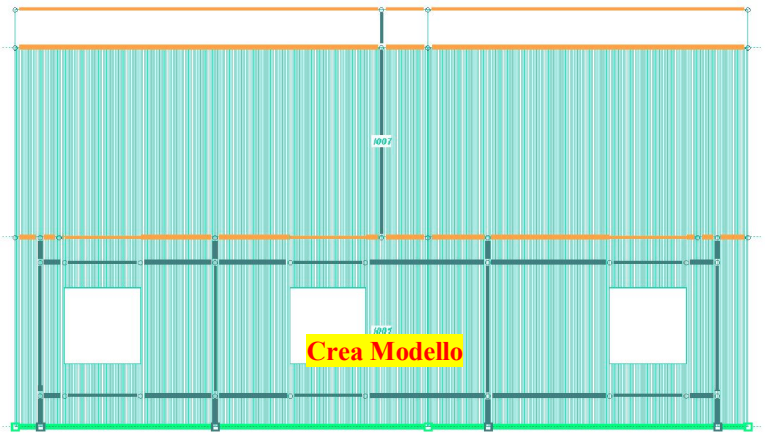


6.3.4 CREAZIONE MODELLO

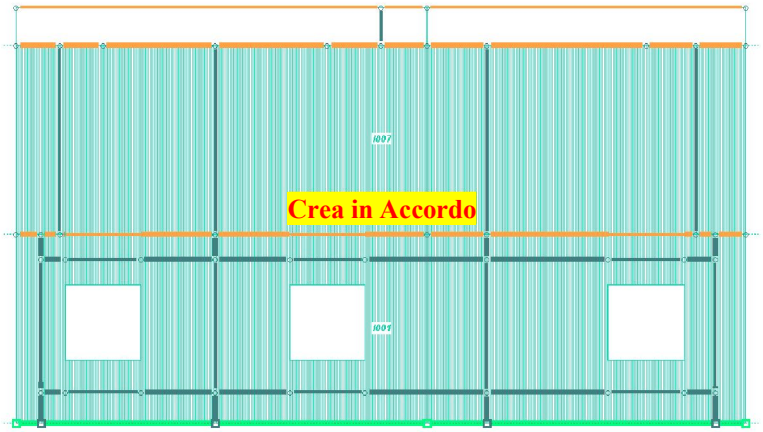
6.3.4.1. GENERAZIONE DEL TELAIO EQUIVALENTE

Con la creazione di interpiani ed aperture termina la fase di inserimento dati relativa alla parte di struttura in muratura: il programma, in automatico, creerà tramite il comando "*Murature → Crea Modello"* il modello ad elementi finiti delle murature per gli interpiani che avremo selezionati; senza ulteriori informazioni da parte dell'utente.

Con la creazione del modello vengono create in automatico le aste rappresentative di maschi murari, fasce di piano e cordoli, e le corrispondenti schede di sezione asta, svincolo asta, estremi rigidi asta etc.

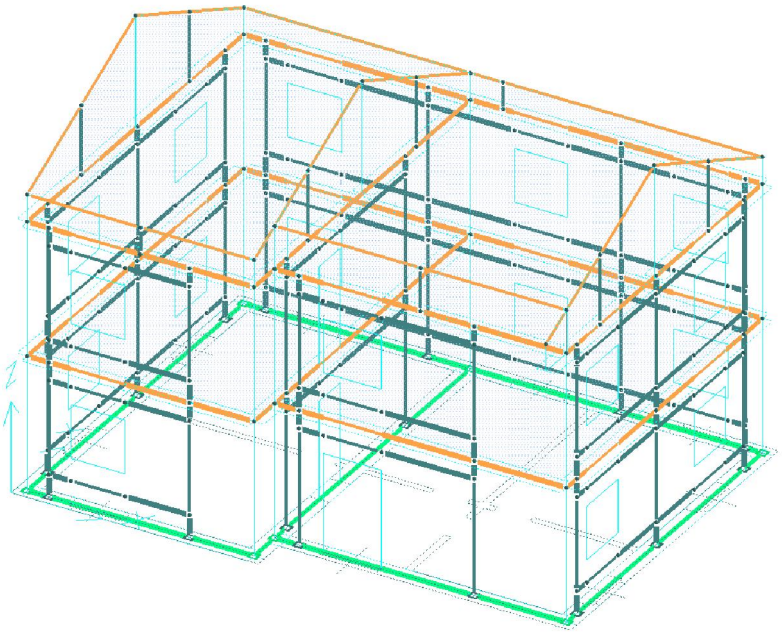


In alcuni casi può però essere utile intervenire ancora sul modello: se un interpiano senza alcuna apertura si viene a trovare al di sopra di un interpiano con molte aperture, il comando "*Murature → Crea Modello"* schematizzerà l'interpiano superiore come un unico maschio murario, col peso complessivo dell'intero interpiano, che potrebbe trovarsi a gravare integralmente al sopra del tratto più flessibile rappresentante una zona in cui è presente un'apertura: ovviamente questo fatto può però rivelarsi oneroso in fase di verifica, in quanto i carichi trasmessi dall'unico maschio murario alle aste del piano sottostante risultano così eccessivamente concentrati. Si utilizza allora in alternativa il comando *"Murature → Crea in accordo"*: chiedendo di accordare il modello dell'interpiano soprastante all'interpiano di base: in questo modo l'interpiano soprastante viene suddiviso in più elementi, collegati fra di loro da un cordolo rigido. Solitamente questa disposizione, per quanto non obbligatoria, risulta meno onerosa per l'interpiano con più aperture, anche se comporta una resistenza complessiva minore per l'interpiano soprastante.



Durante la creazione del modello vengono già spezzate in automatico le aste, ove necessario.

Appena creato il telaio equivalente viene mostrato con gli ingombri solidi attivati.



6.3.4.2 MODIFICHE AL MODELLO

Se una volta generato il modello si presenta la necessità di effettuare delle modifiche (ad esempio eliminando o aggiungendo aperture, modificando le aperture presenti, modificando lo spessore di un interpiano, ecc.), si può utilizzare il comando "*Murature→Modifica modello→Rigenera modello*" che ha il compito di rigenerare il modello degli interpiani selezionati. Questo comando elimina le vecchie aste e ne crea delle nuove schematizzando il nuovo telaio equivalente: eventuali modifiche manuali eseguite sulle aste del vecchio telaio vengono perse cosi come i carichi applicati sul vecchio telaio (ad esempio il peso proprio delle aste).

6.3.4.3 COMPLETAMENTO DEL MODELLO E CALCOLO

Il modello così generato deve poi essere completato con l'inserimento di carichi, vincoli, dati sismici, eventuali livelli rigidi etc., come ogni altro modello di DOLMEN: potrò inoltre inserire elementi in altri materiali, setti. o pilastri in cls etc.

Ad esempio il modello potrà essere completato:

- creando delle travi di fondazione, o ex novo o traslando i cordoli dei primi interpiani al piano di posa e modificandone le sezioni o altre proprietà
- oppure inserendo semplicemente dei vincoli di tipo incastro ai nodi del piano inferiore
- creando una copertura a capriata in legno, con l'avvertenza di svincolare opportunamente le aste in legno nei loro appoggi ai cordoli
- creando dei solai, ed assegnando ad essi i carichi che questi ripartiranno sui cordoli e che dai cordoli si scaricheranno sulla struttura in muratura
- assegnando il carico di peso proprio alle aste costituenti la muratura e agli altri elementi
- inserendo i dati relativi alla zonizzazione sismica ed altro, ed effettuando l'analisi statica e/o dinamica

- inserendo eventuali livelli rigidi e dei gusci col solo spessore di membrana a rappresentare una copertura inclinata
- etc.

N.B. Eventuali elementi di dettaglio, quali le **volte**, potranno essere studiati a parte, con un modello ad essi dedicato.

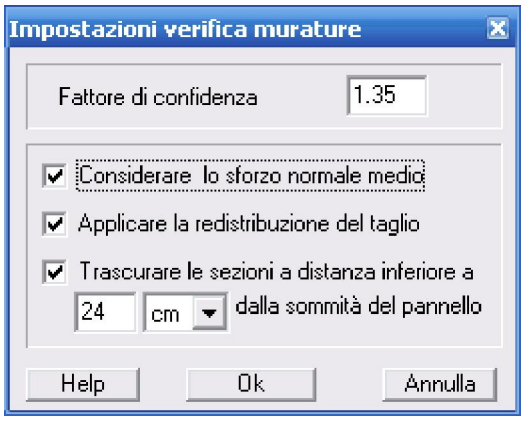
6.4 ANALISI DEL MODELLO E VERIFICHE LINEARI

Una volta completato il modello il calcolo delle sollecitazioni e dei casi di carico avviene come per ogni altra tipologia strutturale. Prima di effettuare il calcolo è comunque consigliato utilizzare nuovamente il comando "*File → Check DB*", per un ulteriore controllo.

I risultati del calcolo delle sollecitazioni e dei casi sono visualizzabili a video con gli usuali comandi del menù "*Risultati*".

Molto utile risulta in particolare "*Risultati → Deformate → Animate*", soprattutto per visualizzare eventuali carenze in fase di definizione di vincoli o collegamenti fra elementi, e in generale per riconoscere errori di input che possano aver comportato delle labilità: nel zona del pannello delle impostazioni delle deformazioni animate vengono quantificate infatti la deformazione massima delle aste e dei nodi, e riportati i nomi del nodo e dell'asta che presentano la massima deformazione.

6.4.1 LE IMPOSTAZIONI DI VERIFICA



Prima di effettuare la verifica degli elementi murari costituenti la struttura in esame occorre impostare le modalità con le quali la verifica verrà effettuata; si tratta di scelte che condizionano fortemente i risultati.

Elenchiamo schematicamente le parti che compongono il pannellino "*Murature → Verifica murature → Impostazioni per verifica*":

- **Fattore di confidenza:** rappresenta un coefficiente parziale di sicurezza richiesto dalla normativa per la muratura esistente. Nel caso di analisi elastica con fattore "q" si applica il fattore di confidenza come ulteriore riduttore delle resistenze agli elementi murari generati da interpiani costituiti da muratura definita come esistente nella scheda resistenze. Nel caso di analisi non lineare (C8.7.1.5) "i valori di calcolo della resistenza da utilizzare sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza".

- **Sforzo normale medio:** si richiede di effettuare la verifica delle sezioni sollecitate degli elementi asta che rappresentano elementi in muratura, utilizzando in ogni sezione per il singolo caso di carico sismico, il valore dello sforzo normale medio sui sestetti di sollecitazione. Consente quindi di considerare sul singolo maschio murario, per ogni combinazione di azioni di verifica, lo sforzo normale mediato sui vari sestetti di sollecitazione. Da questo consegue che, nel prendere in esame una combinazione a segno alterno come ad esempio il sisma, ove il pannello risulta alternativamente con maggiore e minore sforzo normale (N) rispetto al caso statico, il valore di N preso in esame ai fini della verifica sarà un N medio, cioè più o meno quello dovuto ai carichi permanenti.

- **Redistribuzione del taglio**: la Normativa [NTC08 7.8.1.5.2] consente di redistribuire, con determinate limitazioni, il taglio all'interno di uno stesso interpiano: ciò può risultare utile qualora nell'interpiano stesso siano presenti pannelli aventi ancora una riserva di resistenza contemporaneamente ad elementi in difficoltà.

- **Trascurare le sezioni…**: il fatto di trascurare le sezioni a una certa distanza dalla sommità del pannello è dovuto al fatto che il mezzo utilizzato per svolgere l'analisi è un software agli elementi finiti, che vede i pannelli come segmenti che si congiungono nei nodi: invece, nell'ultimo tratto del segmento, abbiamo nella realtà fisica il cordolo, per cui le ultime sezioni di verifica potrebbero non essere rappresentative.

6.4.2 UN PRIMO CONTROLLO: LE TRAZIONI

Dopo il controllo effettuato a monte dell'analisi strutturale tramite il *Check-DB,* è fondamentale eseguire un'ulteriore controllo a valle dell'analisi.

DOLMEN esegue una **analisi lineare** sul telaio costituente la muratura: possono quindi verificarsi delle trazioni che non sono fisicamente possibili nella realtà, dato che per sua natura la muratura non lavora a trazione.

Innanzi tutto occorre controllare se si è verificata questa condizione lanciando il comando "*Murature → Evidenzia*" in abbinamento a "*Selezioni → Murature → Maschi murari in trazione*"; dovremmo vedere evidenziati a monitor gli eventuali maschi murari con questa problematica attiva. A questo punto sarebbe bene cercare di comprendere se il modello necessiti di qualche modifica, ad es. perché alcune aste in copertura non sono state correttamente svincolate o perché si è commesso qualche errore di impostazione, oppure se le trazioni sono da imputarsi alla semplificazione dell'analisi lineare ; questo si verifica ad es. se un pannello murario si trova al di sopra di un'apertura. Per il modello elastico lineare il pannello in questa situazione risulterà appeso al suo cordolo, visto che grava interamente sul tratto flessibile del cordolo sottostante. In questo caso la soluzione è rappresentata dal comando "*Murature → Modifica modello → Svincola N in alto*" applicato al maschio murario in trazione.

6.4.3.LE VERIFICHE LINEARI

Le verifiche sono condotte con l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane e trascurando la resistenza a trazione per flessione della muratura.

Gli stati limite ultimi presi in considerazione per la verifica sono:

- **presso flessione nel piano del muro**;

- **taglio per azioni nel piano del muro**;

- **presso flessione fuori piano** (pressoflessione per carichi laterali, ovvero resistenza e stabilità fuori dal piano);

- sismica locale (verifica come elemento secondario nei confronti della direzione del sisma perpendicolare al piano del pannello)

- flessione e taglio per le travi di accoppiamento (fasce di piano).

Non è generalmente necessario eseguire verifiche nei confronti di stati limite di esercizio di strutture di muratura, quando siano soddisfatte le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi.

N.B. Nelle formule di verifica dei maschi murari, lo sforzo normale, a meno che non sia eccessivo, svolge un ruolo stabilizzante e in generale favorevole: la sua importanza ai fini della verifica è comparabile o anche maggiore di quella dei valori delle resistenza del materiale.

6.4.3.1. PRESSOFLESSIONE NEL PIANO

La verifica a **pressoflessione nel piano** di una sezione di un elemento strutturale si effettua confrontando il momento agente di calcolo con il momento ultimo resistente calcolato assumendo la muratura non reagente a trazione e una opportuna distribuzione non lineare delle compressioni.

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

La formula utilizzata per questa verifica si basa sull'ipotesi di materiale muratura non resistente a trazione, con stress-block rettangolare con coefficiente 0,85, e nasce semplicemente dalla soluzione del sistema costituito dalle equazioni di equilibrio a traslazione verticale e momento. Si noti anche come in questa formula è maggiore il ruolo giocato dal valore dello sforzo normale rispetto al valore di resistenza.

6.4.3.2 TAGLIO NEL PIANO

Nel caso di muratura *nuova,* la resistenza a taglio del pannello è valutata sulla sezione parzializzata, secondo la: $V_t = l' \cdot t \cdot f_{vd}$

dove fvd è strettamente correlata allo sforzo normale agente sulla sezione.

Nel caso di muratura *esistente,* la circolare fornisce una formula alternativa (C8.7.1.5), utilizzabile nel caso di muratura irregolare o caratterizzata da elementi non particolarmente resistenti, basata sull'ipotesi di sezione non parzializzata: anche in questo caso lo sforzo normale incrementa il valore del taglio resistente.

6.4.3.3 PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO

La verifica a pressoflessione fuori piano, o pressoflessione per carichi laterali, controlla che, nel caso *statico*, eventuali eccentricità dei carichi in direzione perpendicolare al piano del pannello stesso non riducano in modo eccessivo la capacità portante del pannello stesso: è infatti opportuno ricordare che le tensioni di compressione possono essere distribuite in modo non uniforme in direzione longitudinale al muro, a causa di un'eccentricità longitudinale della risultante dei carichi verticali, o per azioni spingenti di volte. Le NTC08 propongono un metodo semplificato, in cui la resistenza a compressione della muratura, per l'effetto combinato di eccentricità trasversali del carico e per effetti geometrici del secondo ordine, è ridotta da un coefficiente Φ.

6.4.3.4 SISMICA LOCALE

La verifica *sismica* fuori piano ha, ovviamente, il compito di valutare la resistenza del pannello alle azioni di tipo sismico.

Dal momento che, nel modello a telaio, i pannelli costituenti la struttura hanno funzione di controvento nei confronti dei carichi orizzontali agenti nel loro piano, e sono svincolati ai momenti dovuti a forze perpendicolari al loro piano, ammettiamo che, nei confronti del sisma in direzione ad essi perpendicolare, essi si comportino come elementi *secondari*, e come tali vadano verificati.

Verifichiamo, quindi, i pannelli murari, applicando agli elementi detti una forza orizzontale F_a definita come nella valutazione degli effetti dell'azione sismica sugli elementi costruttivi senza funzione strutturale.

4.3.5. VERIFICA DELLE FASCE DI PIANO

La resistenza a taglio di travi di accoppiamento in muratura ordinaria, in presenza di un cordolo di piano o di un'architrave resistente a flessione efficacemente ammorsata alle estremità, può essere calcolata in modo semplificato come valore minimo fra un V_t e un V_p, ovvero ipotizzando due possibili meccanismi resistenti: in ambedue le formule non viene preso in considerazione lo sforzo normale nella fascia.

6.4.4.COME CONSULTARE I RISULTATI DELLE VERIFICHE LINEARI

Per poter esaminare le verifiche degli elementi in muratura l'utente ha a disposizione, all'interno del sottomenù *"Murature → Verifica murature",* diversi strumenti, sia grafici che numerici:

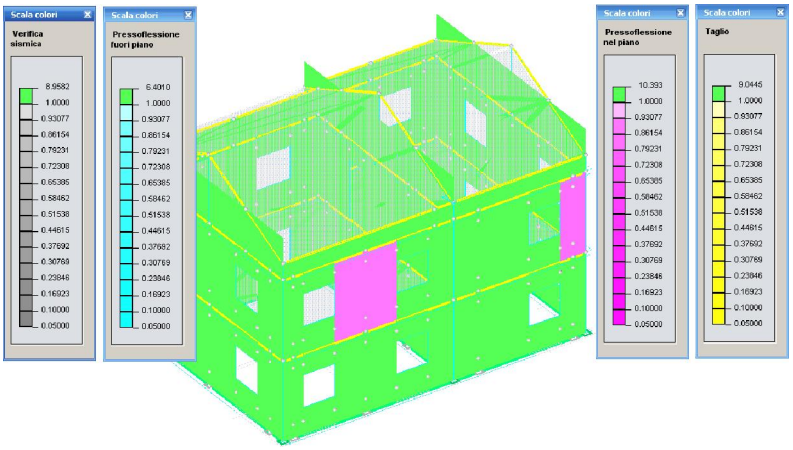
- la classica relazione completa che contiene le verifiche di tutti i maschi murari e tutte le fasce di piano ("*Genera relazione"*);

- la visualizzazione contemporanea a monitor di tutte le verifiche con mappa cromatica dedicata (*"Visualizza risultati"*);

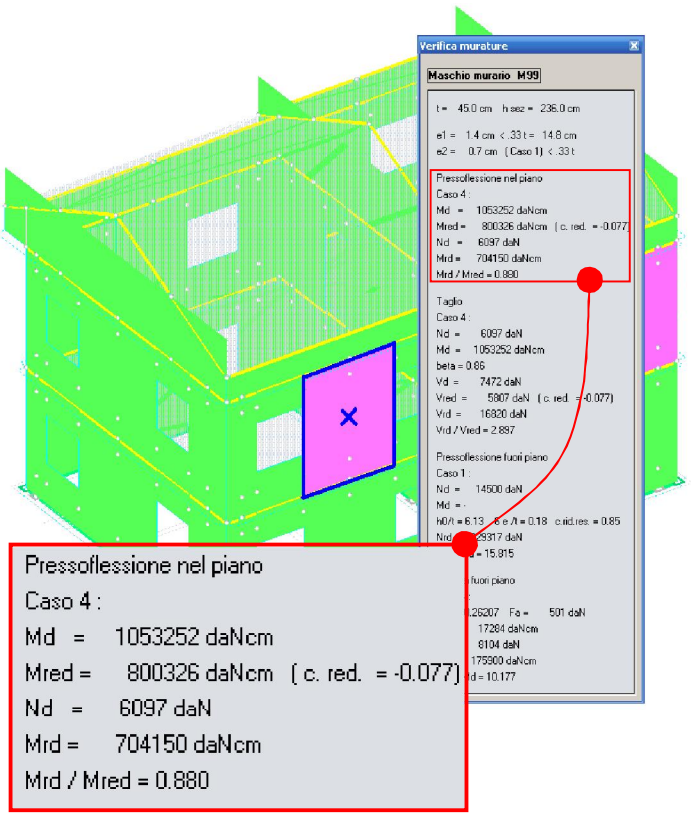
- la lettura locale delle verifiche condotte su un singolo elemento ("*Lettura locale"*);

- il riassunto delle problematiche, ovvero l'elenco schematico delle verifiche non superate ("*Riassunto problematiche"*).

Ciascuno di questi strumenti, nel momento in cui viene utilizzato, esegue in **tempo reale** l'analisi e la verifica degli elementi interessati.



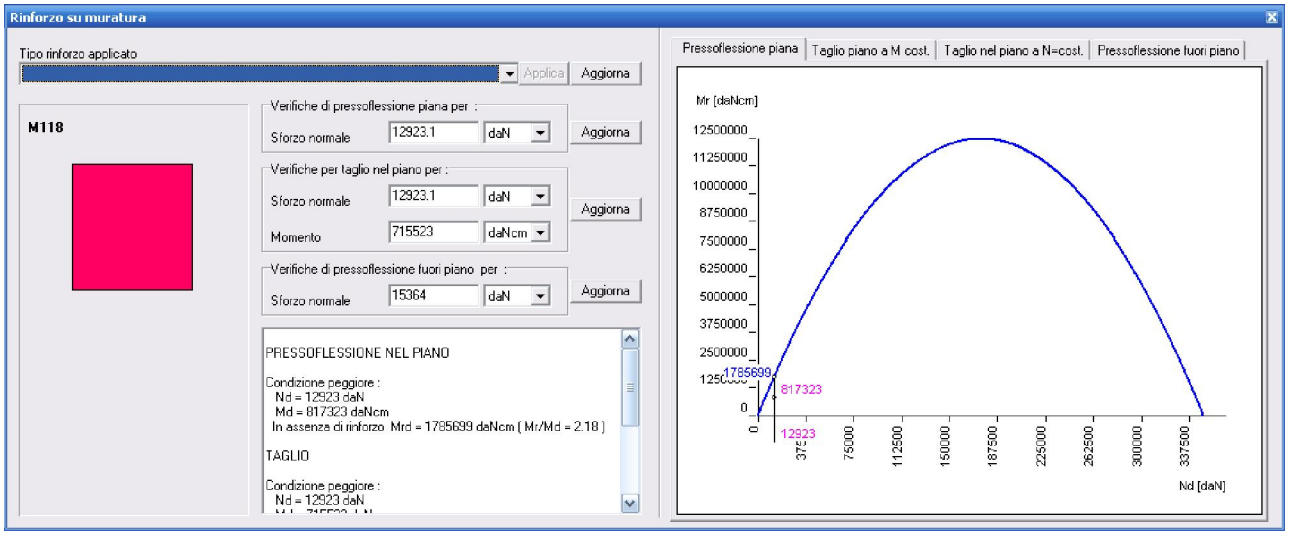
Graficamente ottengo una esaustiva mappa cromatica dei coefficienti di sicurezza minimi per i maschi murari e le fasce di piano lanciando il comando "*Murature → Verifica murature → Visualizza risultati → Carica*"; posso scegliere se focalizzare l'attenzione su una problematica particolare ("Pressoflessione nel piano", oppure "Taglio nel piano", ecc…) o più genericamente lasciare la scelta su "*Complessiva*" per vedere a monitor contemporaneamente tutte le verifiche con le mappe colorate: gli elementi con coefficienti di sicurezza **>=1 verranno rappresentati in verde**, mentre gli altri, non verificati, con colore dipendente dalla verifica che ha dato risultato peggiore.



Posso poi analizzare in dettaglio gli elementi che vanno in crisi, e che ho individuato con l'aiuto delle mappe cromatiche, tramite il comando "*Murature → Verifica murature → lettura locale*": seleziono quindi l'asta appartenente al maschio murario (o la fascia di piano) per controllare contemporaneamente tutte le verifiche eseguite su quell'elemento.

Un ulteriore e più approfondito controllo delle proprietà di resistenza e dello stato di verifica dell'elemento maschio murario si può ottenere tramite il comando "*Murature → Rinforzi →*

Proprietà e verifiche", selezionando l'elemento di interesse: queste proprietà vengono riassunte in un pannello contenente i **domini di resistenza** dell'elemento per le varie verifiche.



Sono rappresentate le curve relative ai domini:

- Mr-Nd (nel piano) **pressoflessione piana**;
- Vr-Nd **taglio piano a M costante**;
- Vr-Md (N cost.) **taglio nel piano a N costante**;
- Mr-Nd (fuori piano) **pressoflessione fuori piano**.

In ogni pagina viene evidenziato in **fucsia** il punto rappresentativo dello stato tensionale per il quale viene eseguita quella verifica in modo da poter velocemente meglio comprendere le problematiche dell'elemento.

Questo comando è stato in realtà pensato per valutare le modifiche ai domini di resistenza apportati dalla presenza di rinforzi: è nato quindi per progettare in modo mirato un intervento di rinforzo ma è comunque utilizzabile anche su elementi non rinforzati.

6.4.5 L'ANALISI LINEARE CON REDISTRIBUZIONE: I COMANDI DI INCREMENTO DELLO SVINCOLO

Nel caso in cui la muratura presenti principalmente problemi relativi alle verifiche nel piano previste dalla normativa, DOLMEN mette a disposizione diversi strumenti per cercare di portare a verifica tali elementi, tutti concettualmente basati su una redistribuzione degli sforzi in funzione della capacità portante dei singoli elementi: in generale la strategia è quella di incrementare il grado di svincolo relativo ai momenti nel piano della muratura dei maschi murari non verificati nel piano,

liberando così parzialmente questi elementi dalle azioni più gravose, che dovranno essere ripartite fra gli altri elementi costituenti la struttura.

Fra questi comandi, il più interessante è l'*incrementa svincolo automatico:* assegnato un valore dell'incremento di svincolo da utilizzare ad ogni iterazione, DOLMEN assegna questo incremento ai maschi murari non verificati nel piano, e esegue nuovamente il calcolo delle sollecitazioni e successivamente dei casi di carico: se a video sono presenti visualizzazioni per mappe di colore dei risultati della verifica, queste vengono aggiornate in automatico.

Man mano che il calcolo automatizzato procede viene mostrata a schermo la schermata del calcolo in corso e come prima riga di testo viene mostrato il minor fattore di sicurezza nelle verifiche riscontrato all'iterazione precedente: la procedura viene ripetuta in automatico sino a quando tale valore è superiore ad 1 (e quindi a soddisfacimento delle verifiche), o quando la struttura, a forza di svincolare, risulta labile.

La legge con la quale vengono apportati gli incrementi ai gradi di svincolo degli elementi non verificati è uguale a quella utilizzata nell'analisi non lineare (pushover).

In questo modo viene simulato un "assestamento" della struttura simulato in DOLMEN attraverso una ripartizione automatica degli sforzi ridistribuiti ad ogni iterazione di calcolo tra gli elementi del telaio equivalente.

N.B.: La struttura originaria viene salvata nel file "pre_iterazioni.str", se questo non è già presente nella cartella di lavoro; se si vuole quindi ripristinare la struttura antecedente alle modifiche occorre riaprire il file "pre_iterazioni.str" e salvarlo come "struttur.str".

6.5 L'ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER)

Con il nome di analisi **PUSHOVER** si indica un'analisi statica incrementale non lineare effettuata per forze orizzontali monotonamente crescenti.

Pushover significa, infatti, "spingere oltre", e rappresenta una procedura impiegata per determinare il comportamento di una struttura a fronte di una determinata azione (forza o spostamento) applicata. Essa consiste nello "spingere" la struttura fino a che questa collassa o fino a che un parametro di controllo di deformazione raggiunge un valore limite prefissato; la "spinta" si ottiene applicando in modo incrementale monotono un profilo di forze o di spostamenti prestabilito.

In sintesi si tratta di una soluzione incrementale - iterativa delle equazioni di equilibrio statico della struttura, in cui la forzante è rappresentata dal sistema di spostamenti o di forze applicato, che consente di definire un legame forza-spostamento caratteristico del sistema studiato, detto curva di capacità.

Per le strutture in muratura, peraltro, quest'analisi è da considerarsi uno strumento efficace di previsione approssimata della sola risposta sismica delle strutture; per le murature, infatti, l'analisi pushover ha lo scopo di valutare la risposta globale di edifici in cui il meccanismo resistente è governato dalla risposta nel piano delle pareti, senza considerare eventuali meccanismi di collasso

associati alla risposta dinamica fuori dal piano. La verifica di tali meccanismi va svolta con altri metodi.

L'analisi globale di un edificio assume quindi significato quando i meccanismi di rottura per ribaltamento fuori dal piano sono prevenuti da opportuni dettagli strutturali quali la presenza di catene e/o cordonature.

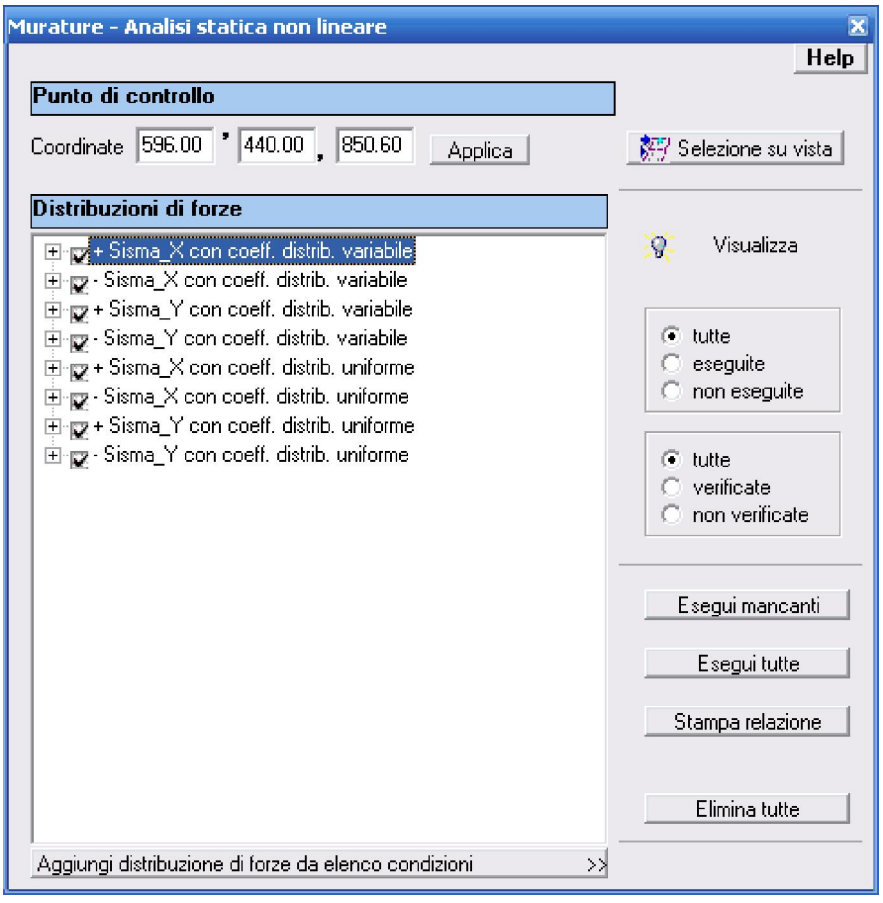
Ne consegue che è di fondamentale importanza che il modello sia semplice, in modo da avere la possibilità di focalizzare l'attenzione sul meccanismo della risposta sismica. Teniamo presente che **il pushover rappresenta un'analisi di un meccanismo di risposta sismica, non una verifica dell'edificio tout court**.

Inoltre, i presupposti di base del pushover sono che la struttura, sottoposta a queste forze via via crescenti, veda una migrazione di sforzi dagli elementi deteriorati a quelli che hanno ancora riserve di resistenza: ne consegue che una struttura che non presenti più elementi resistenti nella direzione del sisma non è suscettibile di una analisi pushover.

Teniamo poi presente che i risultati dell'analisi pushover sono fortemente influenzati dalle scelte effettuate a monte di essa.

Queste scelte consistono principalmente nella definizione:

- del punto di controllo;
- della forma del sistema di forze applicate;
- del meccanismo di progressiva degradazione degli elementi strutturali al crescere dell'entità delle forze .



In DOLMEN il calcolo delle curve di capacità viene attivato tramite il comando "*Murature → Analisi statica non lineare*" che predispone il pannello che consente di effettuare le prime due scelte.

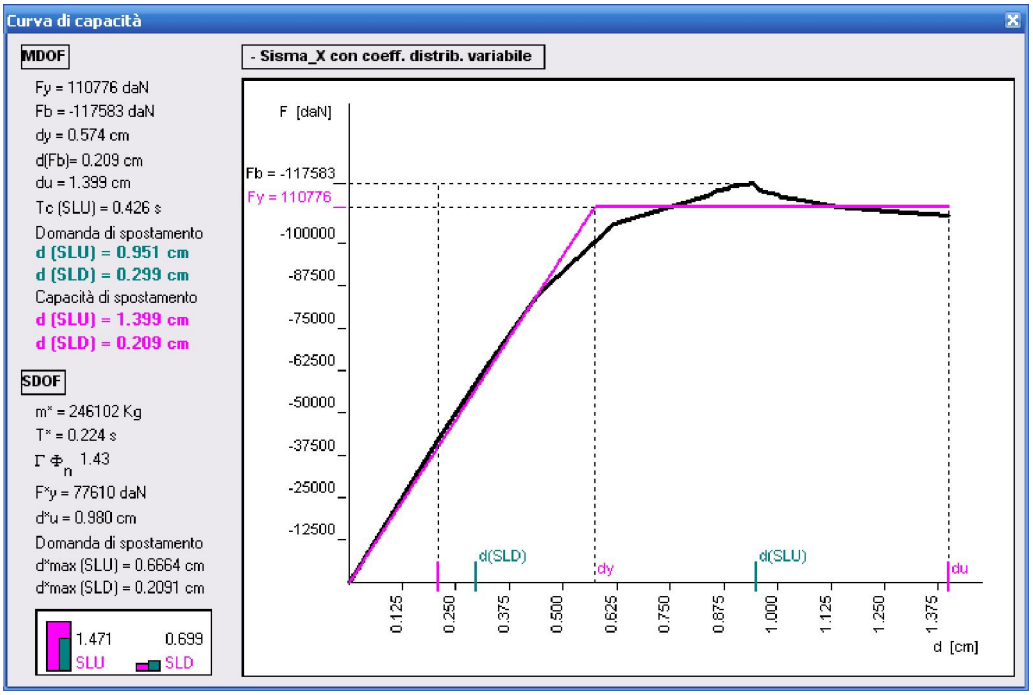
Il **punto di controllo** viene suggerito in automatico dal programma se è stata eseguita l'analisi sismica statica (viene proposto il baricentro delle masse sismiche dell'ultimo

piano) e, come quota, corrisponde al punto più alto della struttura. Se, ad esempio, vengono inseriti dei timpani in muratura la quota massima è corretta, altrimenti se tutta la copertura fosse ad esempio in legno dovrei cambiare il punto con il baricentro delle masse sismiche dell'ultimo piano in muratura.

Nella parte sinistra del pannello sono elencate le **distribuzione di forze** proposte da DOLMEN per il calcolo delle curve di capacità della muratura. Dato che la costruzione di ogni curva di capacità è una procedura iterativa e non lineare, e quindi richiede molto tempo, si consiglia di evitare di eseguire calcoli non necessari. In caso di perfetta simmetria rispetto ad un asse della struttura e dei suoi carichi permanenti è inutile effettuare l'analisi di spinte in ambedue i versi di quell'asse.

Posso comunque aggiungere una qualunque condizione di carici orizzontale (ad esempio gli auto vettori più importanti).

Al termine dell'analisi sarà visualizzata la curva di capacità della muratura con l'indicazione dei fattori di sicurezza SLU e SLD.



NB: questa procedura comporta ovviamente modifiche al file "struttur.str". Per questo motivo all'avvio della procedura viene creato il file" pre_pushover.str" come back-up della struttura non ancora modificata: ricordiamo che se si interrompe il programma durante la generazione di una curva di capacità il file" struttur.str" presente nella cartella di lavoro non è più quello originario ma deve essere ricostruito ricaricando il file di back-up, eseguendo poi su di esso un "compatta schede" e salvandolo come "struttur.str". Questo tipo di analisi richiede notevoli risorse al sistema operativo che quindi si trova seriamente impegnato; per avere conferma dell'avanzamento dell'analisi la finestra del FEM inizia con messaggi propri dell'analisi in corso. Se non fosse visibile premete in basso sulla linguetta "FEM" per portare in primo piano la finestra del FEM.

6.6 I RINFORZI

Terminata l'analisi e la verifica degli elementi costituenti la scatola muraria, alcuni elementi potrebbero risultare non verificati: DOLMEN consente di intervenire inserendo diverse tipologie di rinforzo.

In generale l'intervento deve essere mirato, tale cioè da colmare le carenze strutturali dell'elemento murario, ed è quindi fondamentale conoscere tali carenze; queste informazioni si ricavano agevolmente sia dal testo contenuto in *riassunto problematiche* (utile per avere una panoramica globale dello stato delle verifiche) sia dalla *lettura locale* dell'elemento sia soprattutto dai grafici dei *domini di resistenza*.

I rinforzi, al pari delle altre proprietà degli oggetti del CAD3D Struttura, sono gestiti tramite schede tipologiche: una volta definito il tipo di rinforzo utilizzando la voce "*Murature → Rinforzi → Gestione disposizioni → Schede disposizioni*", questo è assegnabile, modificabile, eliminabile etc., per gli elementi murari, in modo analogo alle altre proprietà strutturali.

Interrogando l'elemento murario tramite il comando "*Murature → Rinforzi → Proprietà e verifiche*" si potrà confrontare il dominio di resistenza dell'elemento rinforzato con quello dell'elemento non rinforzato, e controllare se l'intervento porta l'elemento a verifica.

6.6.1. LE RETI ELETTROSALDATE O IN MATERIALI COMPOSITI

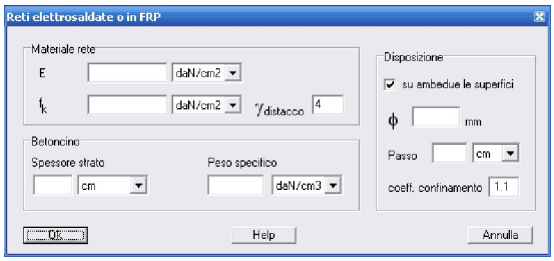
Le istruzioni per l'applicazione delle NTC08 consentono, al punto C.8.A.2, di rappresentare un intervento di consolidamento con intonaco armato su ambedue le facce, come una modifica sia delle caratteristiche di resistenza (f_m e τ_0) sia dei moduli elastici (E e G): ne consegue che questo intervento può essere rappresentato in DOLMEN semplicemente assegnando nuove schede di resistenza muratura e di caratteristiche del materiale all'interpiano, modificando lo spessore di interpiano, ed effettuando nuovamente l'analisi delle sollecitazioni in modo da tener conto della modifica alle rigidezze apportata dal betoncino.

DOLMEN propone anche una formulazione alternativa: quella descritta nella circolare comunque è già di applicabile senza necessità di funzioni specifiche.

Si è ipotizzato che il miglioramento delle caratteristiche dell'elemento murario rinforzato sia dovuto alla combinazione di due differenti meccanismi:

- a **muratura armata,** con armatura con resistenza a compressione nulla a causa della possibilità di distacco dal supporto: sempre per problemi di possibile distacco dal supporto, per le reti elettrosaldate non viene preso in considerazione il pianerottolo di snervamento, ma al materiale rete viene assegnato un comportamento di tipo fragile, ovvero elastico lineare sino al distacco: per questo meccanismo si ipotizza di assegnare al materiale della rete un coeff. di riduzione (**γdistacco)** da applicare alla tensione di snervamento della rete per ottenerne la resistenza di calcolo, riassuntivo delle incertezze su questo tipo di meccanismo.

- per **confinamento,** attivabile solo se l'intonaco armato è presente su ambedue le facce, e riassumibile in un miglioramento delle caratteristiche di resistenza del materiale muratura.



La scheda di definizione delle caratteristiche delle rete mi consente di assegnare anche spessore e peso specifico dello strato di betoncino: DOLMEN ne terrà conto nel calcolo del peso proprio del pannello rinforzato (perché ciò possa avere influenza ai fini della verifica è però comunque necessario rieseguire il calcolo delle sollecitazioni e dei casi di carico) .

6.6.2. I RINFORZI IN TESSUTI MONODIREZIONALI IN FRP

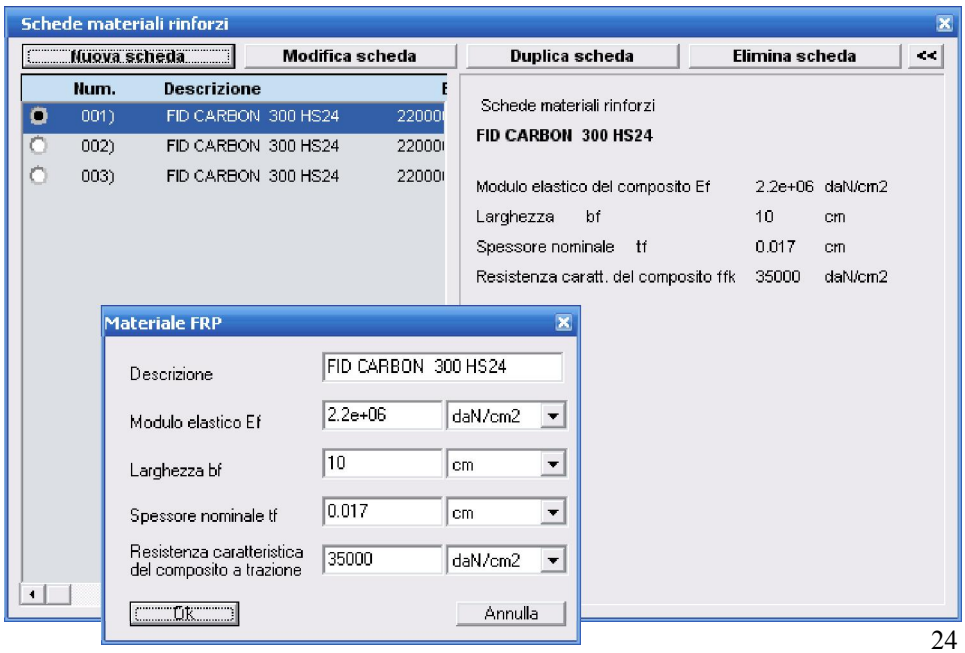
L'utilizzo di **FRP (Fiber Reinforced Polymer)** viene sempre più considerato per il rinforzo e la riparazione di elementi murari portanti (muri, volte, pilastri) in edifici esistenti. L'intervento si basa sull'incollaggio di tessuti costituiti da materiali fibrosi ad elevata resistenza meccanica, applicati sul supporto murario mediante resine di varia natura. La facilità esecutiva della tecnica e l'efficacia del tipo di rinforzo nel sopperire alla carente resistenza a trazione della muratura consentono di realizzare sistemi caratterizzati da limiti di resistenza molto più elevati della muratura tradizionale e da un comportamento a rottura meno fragile.

Il sistema proposto consiste nell'applicazione di strisce di FRP di determinata larghezza mediante apposite resine (nella fattispecie di tipo epossidico), con diverse finalità (regolarizzazione della superficie del supporto, adesione e protezione del fibrorinforzato). I materiali componenti il rinforzo vengono disposti per strati successivi, previa livellatura e pulitura superficiale della muratura nell'area di applicazione; l'efficacia dell'intervento è, infatti, strettamente legata all'adesione del sistema muratura-fibra, al fine di consentire l'attivazione del contributo del rinforzo solidalmente alla muratura.

Il meccanismo di risposta alle sollecitazioni esterne del complesso muratura - FRP è un meccanismo di tipo tirante - puntone. Inoltre, dato che il rinforzo FRP ha un comportamento di tipo fragile, ovvero elastico - lineare sino a rottura, dobbiamo cercare di far sì che la crisi del complesso muratura - FRP si abbia per plasticizzazione della muratura compressa, e non per rottura dell'FRP o per delaminazione, in modo da assicurare duttilità alla struttura.

Ne consegue che **il tipo di intervento è fortemente dipendente dalla problematica riscontrata** sul singolo pannello, dato che questo meccanismo si deve attivare per colmare le lacune specifiche della struttura.

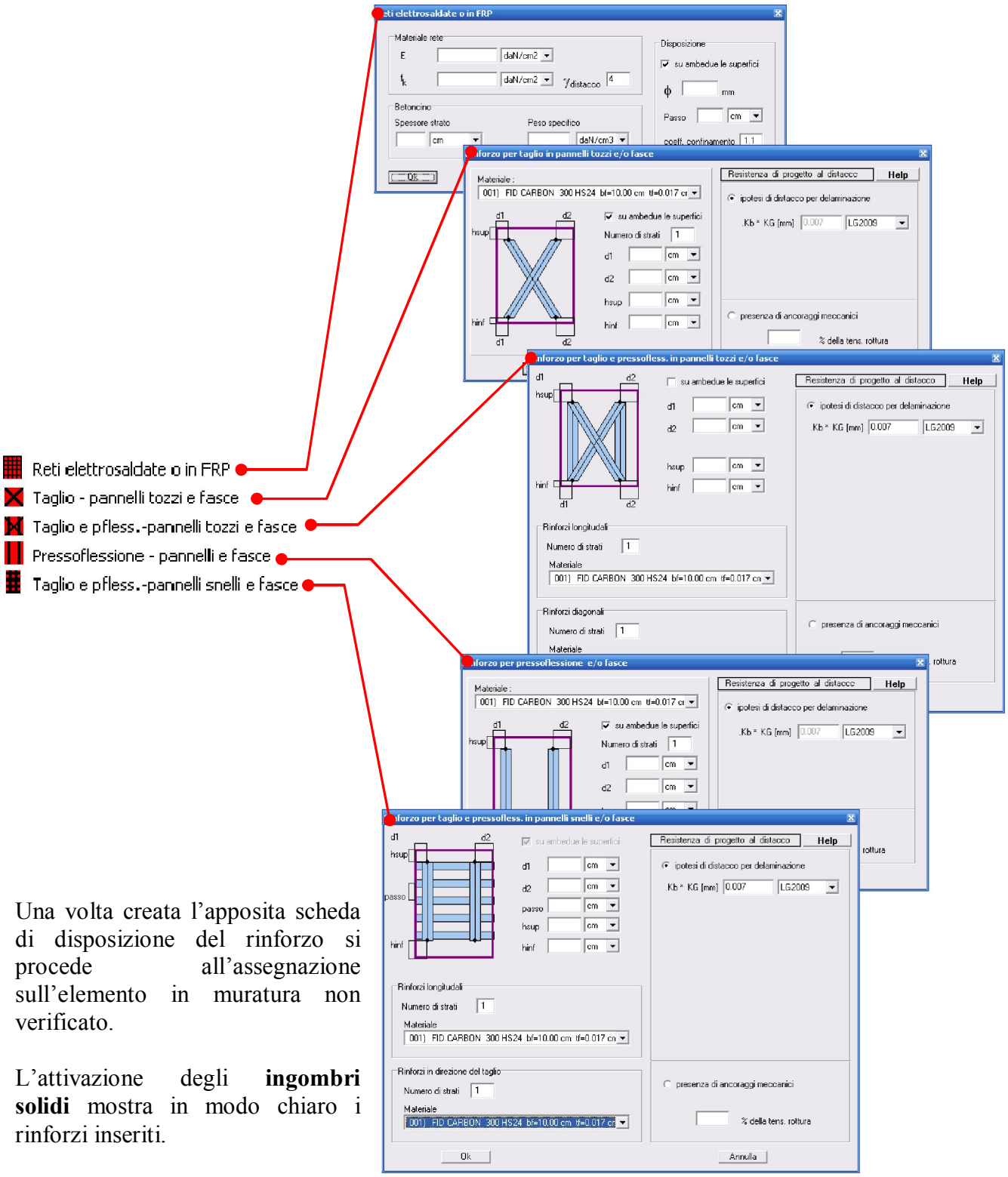
In DOLMEN creo le schede delle diverse tipologie di fibre che voglio utilizzare inserendo i parametri richiesti nel pannello editabile con il comando "*Murature → rinforzi → schede materiale*"



Nel momento in cui andrò ad applicare i rinforzi il programma mi proporrà, per il tipo di soluzione FRP selezionata, le schede materiale che ho precedentemente creato.

6.6.3 L' APPLICAZIONI DEI RINFORZI

Giunti a questo punto siamo ormai consci delle problematiche che non fan giungere a verifica alcune parti della struttura in muratura e quindi creiamo (ed applichiamo) le apposite **schede disposizione** con il comando "*Murature → rinforzi → gestione disposizioni → assegna*".



Una volta creata l'apposita scheda di disposizione del rinforzo si procede all'assegnazione sull'elemento in muratura non verificato.

L'attivazione degli **ingombri solidi** mostra in modo chiaro i rinforzi inseriti.

Oltre allo scegliere nel modo più opportuno il tipo di intervento per conferire all'elemento murario non verificato il corretto apporto di resistenza in funzione delle carenze in esso rilevate dall'analisi

strutturale, è molto importante definire correttamente i dati per il calcolo della tensione di delaminazione, che rappresenta la tensione ultima di calcolo del rinforzo: dal punto di vista operativo, è inutile utilizzare rinforzi ad altissima resistenza quando questi sono fortemente penalizzati dalla scarsa resistenza al distacco dovuta all'incollaggio su un materiale quale la muratura. Dal punto di vista del calcolo delle caratteristiche di resistenza, utilizzare la formula generica fornita dalla Linee Guida del 2009 porta a tensioni di delaminazione notevolmente inferiori a quelle di rottura, e quindi a un dominio di resistenza non tanto diverso da quello dell'elemento non rinforzato: si ricorda però che nelle Istruzioni CNR (CNR-DT 200/2004), dalle quali queste Linee Guida sono originate, si afferma che "quando si faccia ricorso a particolari dispositivi di ancoraggio, la forza massima di ancoraggio deve essere valutata mediante apposite indagini sperimentali", per cui nel pannello di inserimento dati per il calcolo della delaminazione, è consentito anche definire la tensione di distacco di calcolo direttamente come percentuale di quella di rottura.

6.7 I MODELLI A GUSCIO

Ricordiamo che in DOLMEN sono implementati elementi finiti di tipo "guscio", con comportamento sia a piastra che a membrana: questi elementi sono utilizzabili nel contesto delle murature per modellare e verificare strutture di tipo diverso dalla comune scatola muraria schematizzabile a telaio equivalente.

Inoltre, nel menù "*Struttura → Gusci → Gestione spessori"* sono presenti svariati comandi per generazione automatica di mesh di vario tipo: in particolare, volendo modellare delle volte, converrà utilizzare il comando "*Genera mesh per volta*": inserendo i 9 punti su cui poggia la volta e i relativi dislivelli il modello della volta viene generato in automatico.

Si consiglia peraltro di non inserire la volta o le volte così modellate all'interno di un modello complessivo a telaio equivalente, ma di considerarle come un particolare costruttivo, da studiare separatamente con un modello dedicato ; ai fini del modello tridimensionale dell'intero complesso è sufficiente inserire i carichi statici portati dalle volte direttamente sui cordoli del telaio.

La verifica di elementi murari discretizzati con gusci viene effettuata con il comando "*Murature → Verifica murature → Verifica modelli a guscio"*. La verifica si basa sull'ipotesi che il materiale abbia un diagramma sforzi-deformazioni di tipo elasto-plastico, con pendenze e valori allo snervamento differenti fra il tratto in compressione e quello in trazione: viene quindi effettuata col porre un limite alla tensioni principali superiori ed inferiori, ovviamente diverso per trazioni e compressioni. Il coefficiente di sicurezza che ne deriva è semplicemente il minore dei rapporti fra il limite ipotizzato e la tensione principale.