

DBDsoft per la progettazione sismica

Un software innovativo per la progettazione sismica di strutture basato sul metodo diretto agli spostamenti (Direct Displacement Based Design)

Timothy J. Sullivan, EUCENTRE

Flavio Bono, EC Joint Research Centre¹

Gian Michele Calvi, EUCENTRE

Abstract

La procedura di progettazione sismica basata sul metodo agli spostamenti (Direct Displacement Based Design - DDBD) è stata sviluppata molto per diversi sistemi strutturali e varie tipologie di materiali. Tuttavia, al momento, non sembrano esserci ancora applicazioni software che implementino tale approccio. E' stato pertanto avviato un progetto di ricerca al EUCENTRE, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile, per lo sviluppo di un programma per computer denominato DBDSoft per la progettazione sismica di strutture basate sul metodo DDBD.

Lo sviluppo del programma ha richiesto la risoluzione di diverse problematiche e un approccio innovativo rispetto ai tradizionali programmi di ingegneria. Nel presente articolo sono riportati alcuni cenni di teoria del metodo implementato e sono descritte le funzionalità del programma per la progettazione di edifici a telaio o con pareti in cemento armato.

Lo sviluppo del presente programma ha richiesto la definizione di un nuovo approccio alla progettazione che consente l'assegnazione delle proporzioni di resistenza dei sistemi strutturali e la configurazione della posizione delle cerniere plastiche. Una volta definiti questi aspetti della struttura, il programma esegue analisi di equilibrio al fine di definire i valori delle forze di progetto, in linea con il metodo diretto DBD. I limiti dell'attuale versione del software sono discussi e sono identificate le aree di ricerca importanti per i futuri sviluppi del programma.

Introduzione

Nel 1993, Priestley (1993) ha individuato una serie di limiti concettuali nei metodi di progettazione di strutture basati sull'approccio alle forze, presenti nelle correnti normative antisismiche. Per far fronte a tali limiti, (descritti in dettaglio in Priestley et al. 2007), negli ultimi due decenni è stato sviluppato e testato un gran numero di procedure di progettazione sismica basate sugli spostamenti

¹ L'autore ha contribuito al progetto di ricerca DBDSoft durante la sua attività presso l'EUCENTRE.

(DBD) (vedi, ad esempio, i metodi esaminati in Sullivan et al. 2004). Nonostante l'intensa attività di ricerca riguardante tale metodo, a quanto sappiamo, nessun software di calcolo è stato fino ad ora sviluppato per l'applicazione di una delle procedure basate sul DBD. L'approccio "Direct DBD" (DDBD) di Priestley e co-ricercatori è, a oggi, il metodo DBD più sviluppato, con un testo sull'argomento (Priestley et al., 2007) e, più recentemente, un codice modello (Sullivan et al., 2012a). Nel presente articolo sono riportate le basi della metodologia DBD, rilevanti per lo sviluppo del software qui presentato mentre, per una trattazione dettagliata della metodologia del metodo DDBD, si rimanda a Priestley et al (2007).



Figura 1 – Schermata di avvio del programma DBDSoft.

IL RUOLO DELLE PROPORZIONI DI RESISTENZA NEL METODO DIRETTO DBD

Come descritto da Sullivan et al. (2005), le proporzioni di resistenza ai carichi sismici degli elementi strutturali possono essere assegnate all'inizio di una procedura diretta di DBD come parte di una strategia innovativa di progettazione antisismica. L'assegnazione di tali proporzioni di resistenza si basa sui concetti di equilibrio e di compatibilità degli spostamenti. Una qualsiasi distribuzione della resistenza che sia in equilibrio con le forze totali applicate e che rispetti la compatibilità degli spostamenti (che assicura quindi che la capacità di deformazione dei singoli elementi della struttura non sia superata per un dato spostamento del sistema) fornisce una distribuzione valida per il progetto.

In una configurazione tipica di edificio quale, ad esempio, quella di un edificio a telaio e parete collegati tra loro da solai in c.a. (figura 2), la richiesta di spostamento dei telai coincide con quelle della parete a esso collegata. Per tale motivo (ipotizzando che la richiesta totale superi lo spostamento a snervamento delle pareti e dei telai) la resistenza totale laterale dell'edificio, per uno spostamento specifico di progetto Δ_d , può essere considerata pari alla somma delle resistenze offerte dal telaio e dalla singola parete. Pertanto, come spiegato da Paulay (2002) e Sullivan et al (2005), i progettisti possono, in questo caso, scegliere le proporzioni di resistenza che preferiscono, con due diverse distribuzioni di resistenza entrambe valide, come riportato in figura 2b e 2c.

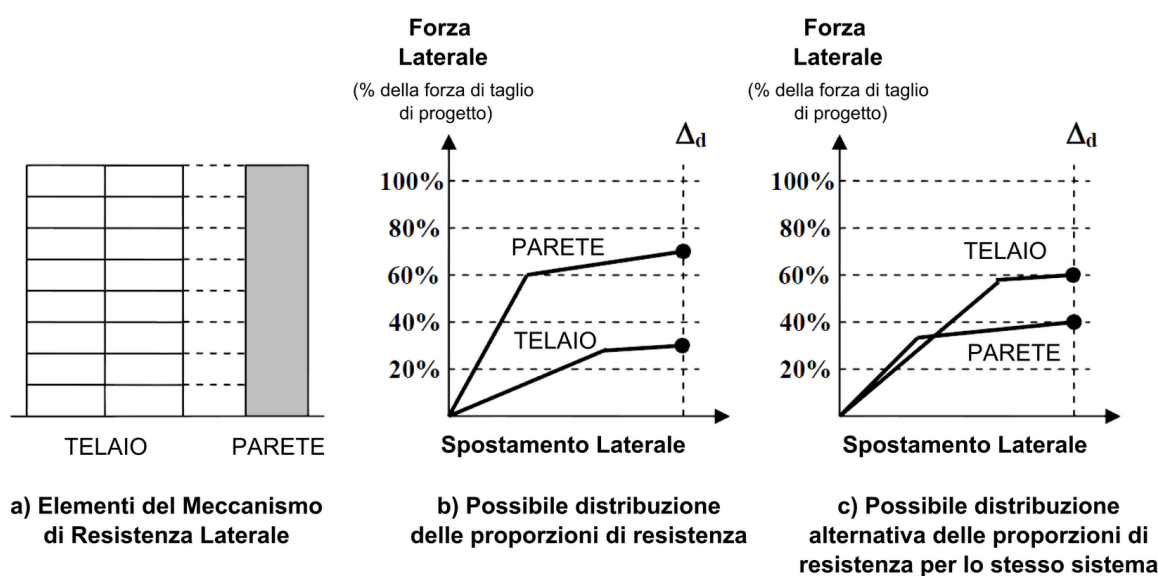


Figura 2 – Esempio di possibili distribuzioni delle proporzioni di resistenza di progetto per un edificio in c.a. di tipo telaio-parete.

Il valore di progetto del taglio alla base per le due diverse distribuzioni di proporzioni di resistenza, illustrate in figura 2, potrebbe differire a causa delle diverse quantità di dissipazione di energia che possono essere fornite dagli elementi strutturali per lo spostamento di progetto dato. Nell'esempio di figura 2, la parete raggiunge lo snervamento in corrispondenza di uno spostamento considerevolmente inferiore rispetto al telaio ed è soggetta a maggiori richieste di duttilità; nel caso venga assegnata una maggiore proporzione di resistenza alla parete di questo sistema, potrebbe risultare un taglio alla base totale inferiore. Le soluzioni progettuali ottimali non sono tuttavia sempre dettate dalla necessità di ottenere una forza minima di taglio totale alla base e potrebbe essere invece preferibile limitare il taglio agente sulle pareti per motivi architettonici; in tal caso un maggiore contributo del telaio sarebbe preferibile, anche se probabilmente non costituirebbe la soluzione strutturale più efficiente.

La libertà di assegnare le proporzioni di resistenza secondo l'approccio sopra presentato è parte integrante del metodo DDBD. Ad esempio si noti che, secondo Priestley et al (2007), lo spostamento inter-piano a snervamento di un telaio in c.a., θ_y , può essere stimato utilizzando la seguente espressione:

$$\theta_y = \frac{2\varepsilon_y L_b}{h_b} \quad (\text{Eq. 1})$$

dove ε_y è la deformazione a snervamento dell'armatura longitudinale, L_b è la lunghezza della trave e h_b è l'altezza della sezione della trave. Questa pratica espressione può essere estesa al caso in cui un telaio ha n campate di diversa lunghezza e travi di diverso spessore, calcolando il *drift* di ogni campata e, successivamente, un *drift* medio dei piani, $\theta_{y,avg}$, utilizzando le proporzioni di resistenza alla flessione ($M_{b,i}$) come mostrato in Eq.(2):

$$\theta_{y,avg} = \frac{\theta_{y,1}M_{b,1} + \theta_{y,2}M_{b,2} + \dots + \theta_{y,n}M_{b,n}}{\sum_{i=1}^n M_{b,i}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Un altro esempio nel quale sono utilizzate le proporzioni di resistenza consiste nella stima del profilo verticale di deformazione di strutture a telaio-parete, come spiegato da Sullivan et al (2005). Aumentando la percentuale di resistenza assegnata al telaio, sarà abbassato il punto di momento nullo nelle pareti e questo, a sua volta, definisce il profilo di deformazione dell'edificio. Inoltre, al fine di combinare valori di smorzamento viscosi equivalenti di due o più sistemi che lavorano in parallelo, può essere utilizzato un approccio che si basa sulle proporzioni di resistenza (vedi Priestley et al. 2007 e Sullivan et al. 2012a).

SFIDE PER LA REALIZZAZIONE DI UN PROGRAMMA DI CALCOLO BASATO SUL METODO DDBD

I programmi tradizionali di analisi strutturale utilizzano i concetti classici della meccanica per definire la matrice di rigidezza che si riferisce agli spostamenti e alle forze interne dei singoli gradi di libertà della struttura. Per le analisi sismiche dello spettro di risposta modale, la matrice di rigidezza è utilizzata, unitamente alla matrice di massa, per identificare forma e periodo dei diversi modi di vibrazione. I periodi di ogni modo sono utilizzati per leggere i valori delle ordinate dello spettro di risposta che, insieme con la massa che partecipa a ciascun modo, possono quindi essere utilizzati per identificare la forza modale e le componenti di deformazione della struttura.

Sebbene l'approccio per la definizione della matrice di rigidezza sia basato su solidi principi di risposta elastica, tale approccio possiede una lacuna nel caso della progettazione di strutture in c.a.: le proprietà della sezione fessurata di un elemento in c.a. dipenderanno, infatti, dalla resistenza assegnata della sezione stessa, non solo dalle dimensioni della sezione e pertanto le proprietà della sezione non possono essere realmente conosciute fino alla fine del processo di progettazione. Questa caratteristica delle sezioni in c.a., individuata solo in questi ultimi decenni, si basa sull'osservazione che la rotazione plastica delle sezioni in c.a. tende a essere indipendente della resistenza della sezione, ma dipende principalmente dalla profondità della sezione e dalla deformazione plastica dell'armatura (Priestley et al (2007) tra altri). Pertanto, poiché la rigidezza secante di una sezione in c.a. può essere ottenuta dividendo la resistenza flessionale della sezione per la rotazione plastica della sezione stessa (data dal prodotto del modulo E_{cr} per il momento d'inerzia I_{cr} della sezione in c.a. fessurata) la rigidezza delle sezioni in c.a. dipende dalla resistenza flessionale delle sezioni; questo implica che sezioni della stessa dimensione possono offrire livelli di rigidezza molto differenti se la loro armatura o la forza assiale nella sezione differisce significativamente. Quest'aspetto delle sezioni in c.a. è illustrato in figura 3 (da Priestley et al. 2007) dove è riportata la risposta momento-curvatura ideale della medesima sezione in c.a. con diverse quantità di armatura longitudinale.

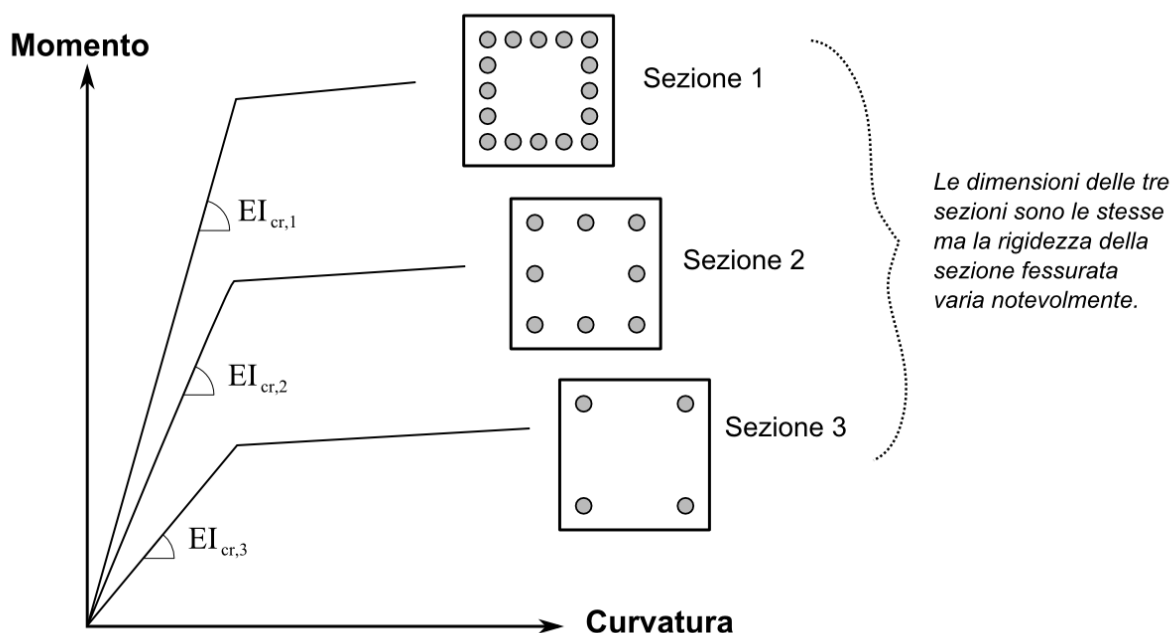


Figura 3 – Diagramma Momenti-Curvatura idealizzato della risposta di una sezione CA con tre differenti quantità di armatura (modificato da Priestley et al. 2007).

Nel metodo diretto DBD non è necessario stimare la rigidezza della sezione fessurata poiché la procedura identifica la rigidezza efficace (secante) necessaria per soddisfare i limiti di deformazione di progetto. Tuttavia, se da una parte questo metodo aiuta a superare i limiti della progettazione basata sulle forze, dall'altra richiede lo sviluppo di un nuovo modo di intraprendere l'analisi strutturale che deve quindi necessariamente essere concepita secondo nuovi canoni per un'efficace implementazione della procedura DDBD.

Un'altra sfida per lo sviluppo di un programma per computer basato su DDBD è dettata dal fatto che tale metodo è, per sua natura, da intendersi come uno strumento di progettazione e non una procedura di analisi. Per poter quindi implementare efficacemente il metodo DDBD è necessario consentire all'utente la possibilità di indirizzare e dettare la soluzione progettuale. Ad esempio, come discusso in precedenza nel caso di figura 2, è evidente che può esistere un numero quasi infinito di soluzioni valide per la progettazione sismica di una costruzione di tipo telaio-parete di dimensioni specifiche; ciò è dovuto al fatto che diverse proporzioni di resistenza possono essere assegnate ai sotto-sistemi telaio e parete. Il progettista deve quindi rimanere libero di impostare le proporzioni di resistenza e deve poter sviluppare la soluzione più adatta alle esigenze specifiche del progetto. E' da notare che, contrariamente al metodo DDBD, i tradizionali strumenti di analisi sismica non offrono una tale libertà al progettista poiché i valori di rigidezza utilizzati nei tradizionali programmi di analisi strutturale dipendono unicamente dalle dimensioni della sezione; ciò implica che, una volta impostate le dimensioni della sezione, sono necessariamente definiti anche i valori di rigidezza che, come discusso in precedenza e con riferimento alla figura 2, non

sono tipicamente validi nel caso di sezioni in c.a., dato che la rigidezza dipende dalla quantità di armatura longitudinale e dal carico assiale.

IL PROGRAMMA DBDSoft

Nonostante la complessità che lo sviluppo di un programma per computer basato sul metodo diretto DBD deve affrontare, è stato recentemente realizzato presso l'EUCENTRE (www.eucentre.it) il software DBDSoft (Sullivan et al 2012) come parte di un progetto di ricerca finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile italiana.

Il programma DBDsoft intende costituire un efficace ausilio alla progettazione di strutture guidando l'utente nella definizione di tutte le caratteristiche geometriche e fisiche dell'edificio e automatizzando le procedure di verifica e calcolo; in tal modo è possibile modificare agevolmente i dati di ingresso per ottenere risultati in linea con le prestazioni attese.

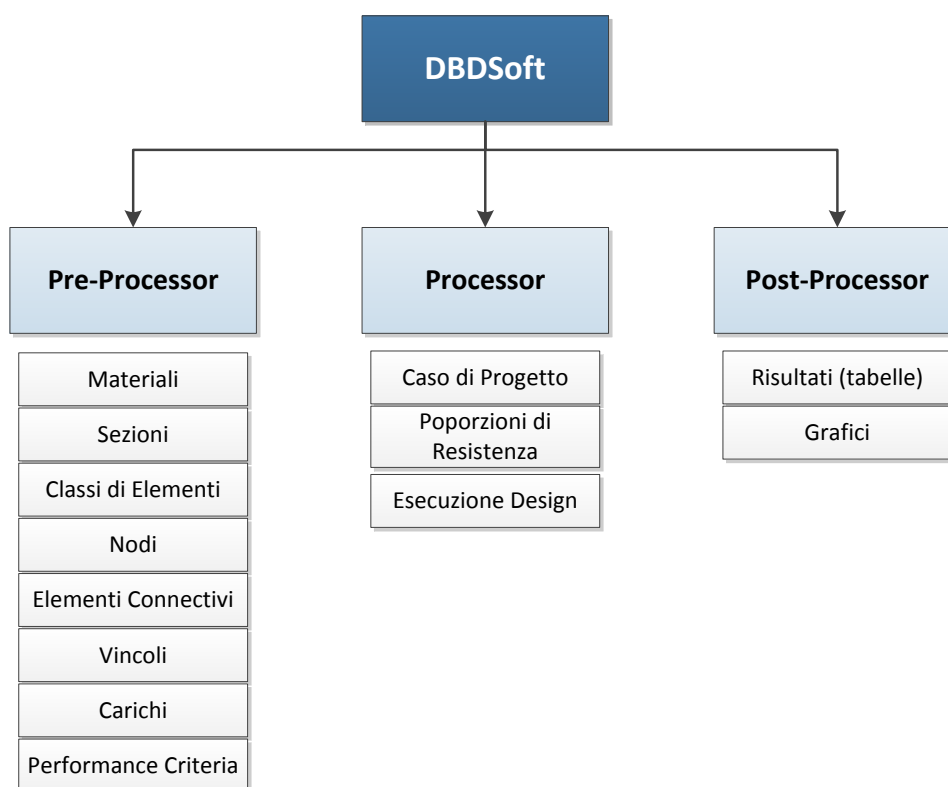


Figura 4 – Struttura dei moduli del software DBDSoft

Il software è in continua fase di sviluppo, sia per l'inserimento di nuove funzionalità, sia per l'estensione del metodo con l'implementazione di nuove procedure basate sui più recenti sviluppi della ricerca.

Il programma è suddiviso in tre moduli principali secondo il flusso logico delle fasi di progetto di una struttura secondo il metodo DDBD (vedi figura 4):

- **Pre-Processor:** definizione delle proprietà dei materiali e della geometria strutturale
- **Processor:** identificazione dei meccanismi resistenti, definizione delle proporzioni di resistenza e analisi
- **Post-Processor:** visualizzazione dei risultati

La finestra principale del programma è suddivisa principalmente in due parti: sul lato sinistro sono presenti le griglie di inserimento e visualizzazione dei dati relativi alla scheda selezionata (ad es. le sezioni relative ai materiali, nodi o elementi di collegamento) mentre l'area principale è destinata alla visualizzazione 3d della struttura.

Il modello in 3d può essere automaticamente aggiornato in modo da visualizzare immediatamente ogni cambiamento effettuato sui dati relativi alle caratteristiche geometriche della struttura. Il programma consente il progetto di strutture in due e tre dimensioni; in quest'ultimo caso devono essere specificati i carichi nelle due direzioni principali X e Y e l'analisi viene effettuata dal programma per le due direzioni in modo distinto.

Nel diagramma successivo sono riportate le fasi del progetto di una struttura con DBDSoft; i tre livelli corrispondono ai tre moduli principali (pre-processing, processing, post-processing) mentre in azzurro sono indicate le attività che richiedono l'intervento diretto dell'utente (ad es. per l'inserimento delle proprietà della struttura) mentre in arancione vengono indicati i processi automatici del programma. Nei paragrafi seguenti è fornita una panoramica della versione corrente del software.

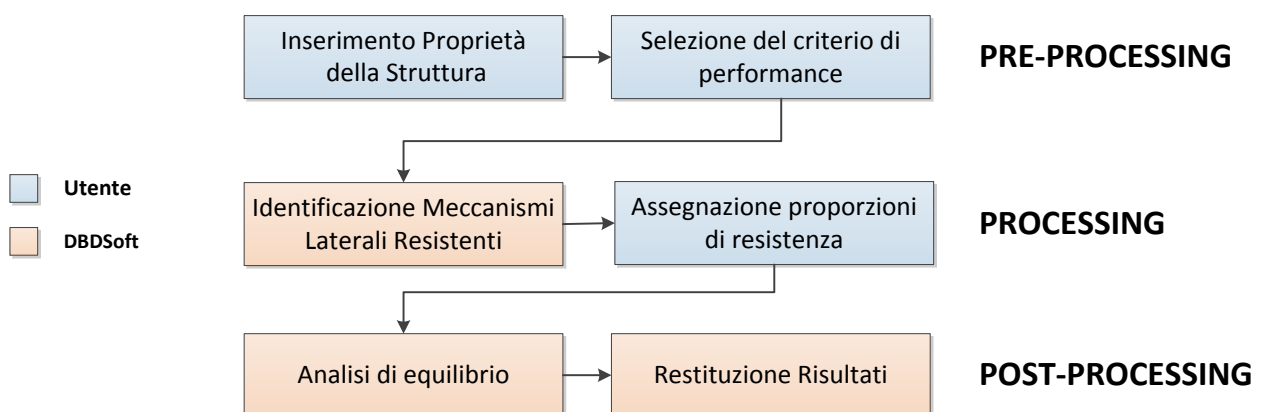


Figura 5 –Diagramma delle fasi di progetto di una struttura in DBDSoft

Proprietà del materiale e geometria strutturale

Prima di iniziare a progettare la struttura in DBDsoft (Sullivan et al., 2012), il progettista deve innanzitutto decidere la posizione degli elementi di resistenza al carico laterale e identificare le

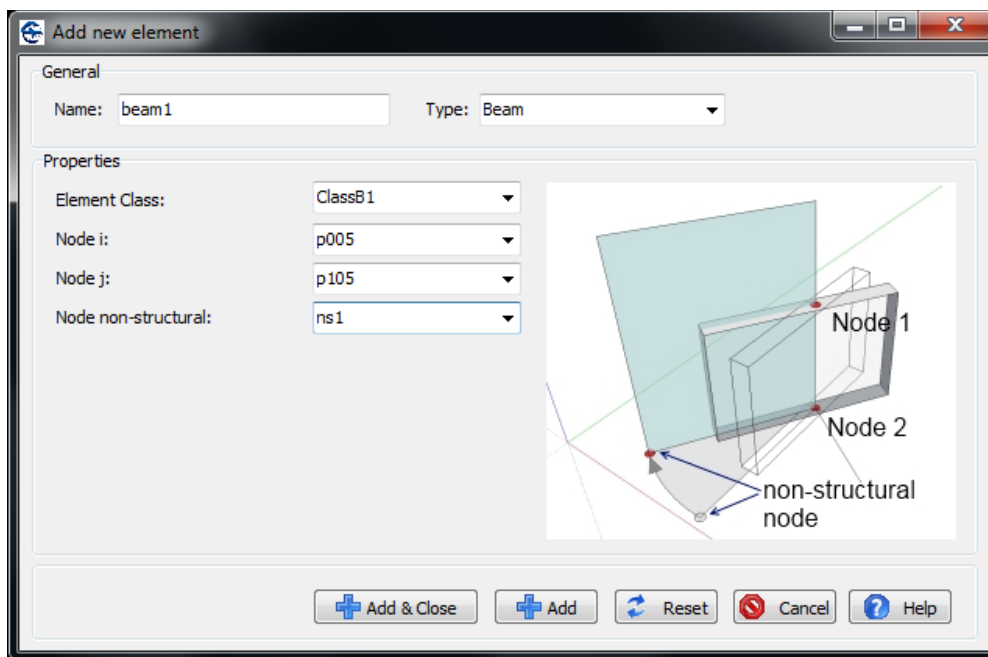


Figura 7 –Finestra di inserimento di nuovi elementi (collegamenti tra i nodi)

Nel programma possono essere specificati due diversi tipi di condizioni di vincolo: (i) i vincoli dei singoli nodi, (come mostrato in figura 8 a sinistra), che dovrebbero trovarsi alla base della struttura, e (ii) gli sblocci flessionali (*releases*) degli estremi di un elemento in corrispondenza di cerniere o di connessioni a cerniera (figura 8 a destra).

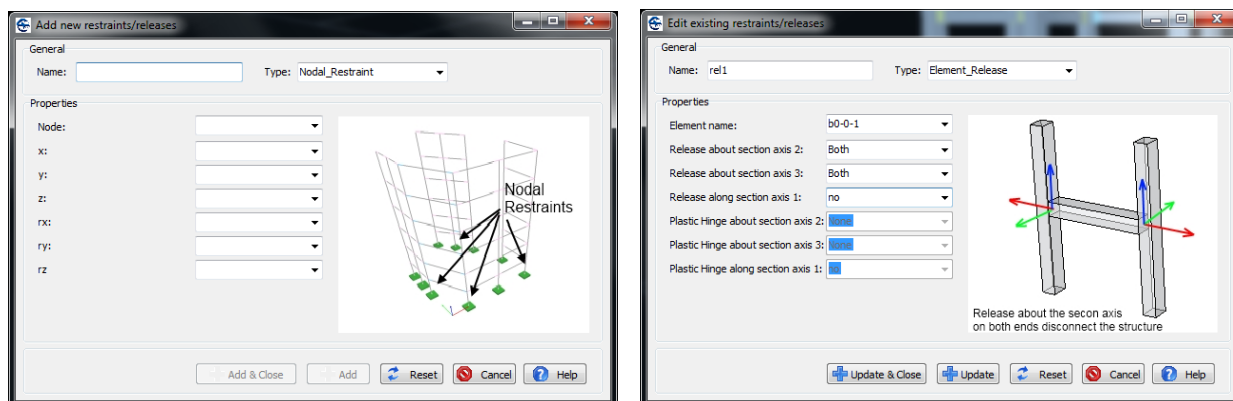


Figura 8 –Finestra di inserimento dei vincoli nodali (Nodal Restraint) a destra e definizione degli sblocchi (sinistra)

Carichi e criteri di progettazione

Poiché DBDsoft è basato sul metodo diretto DBD, lo spettro di progetto, che costituisce un dato in ingresso, corrisponde allo spettro di risposta degli spostamenti. Lo spettro di progetto deve essere distinto per ciascuna direzione principale X e Y, così come per ogni livello di intensità che deve essere considerato nella progettazione (anche se è da sottolineare come, se gli spettri a diversa

intensità hanno la stessa forma, si potrebbe utilizzare un singolo spettro di spostamento per poi ridimensionarlo con diversi fattori di amplificazione nella combinazione di carico).

La figura 9 mostra la finestra di inserimento dei dati relativi allo spettro di risposta degli spostamenti. Per specificare lo spettro di risposta degli spostamenti il programma richiede soltanto l'inserimento dello spostamento spettrale (*corner displacement*), $\Delta_{D, 5\%}$, e il valore del periodo (*corner period*), T_D come indicato dall'immagine del programma. Il software assume quindi richieste di spostamento spettrale linearmente crescenti a partire da zero (per un periodo $T = 0s$) fino ad un massimo (per un periodo $T = T_D$), con un plateau in termini di spostamento spettrale per periodi superiori a T_D . Al fine di evitare la sovrastima delle richieste di spostamento spettrale per valori di periodo bassi, il programma chiede inoltre che venga definita un'accelerazione di picco del terreno; tale accelerazione viene poi internamente moltiplicata per un fattore 2.5 al fine di stimare il plateau di accelerazione spettrale, utilizzata per limitare il taglio alla base di progetto in linea con le raccomandazioni di Sullivan et al (2010).

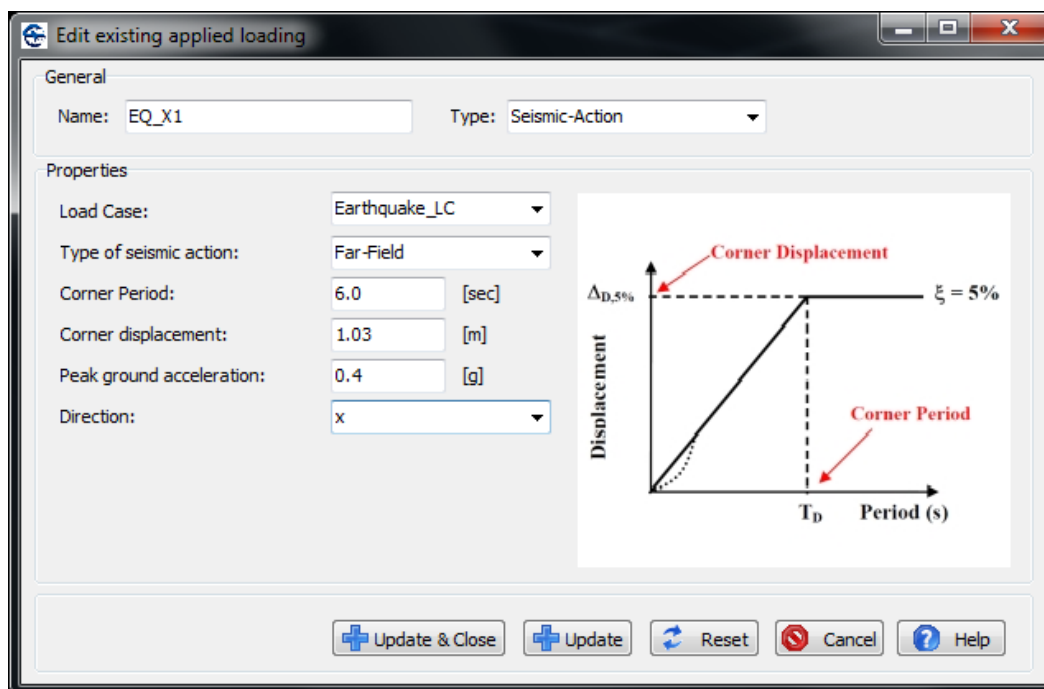


Figura 9 –Finestra di inserimento dei dati relativi ai carichi (selezione di azioni tipo sismico)

Oltre a specificare il carico sismico, l'utente deve definire le masse da considerare con i carichi sismici. Nella versione corrente di DBDsoft le masse sismiche devono essere inserite come masse concentrate ai nodi mentre è previsto che nelle future versioni vengano implementate opzioni aggiuntive per la specifica di diverse tipologie di massa (ad es. masse distribuite).

Il metodo DDBD mira a identificare la resistenza richiesta in corrispondenza delle cerniere plastiche in modo da garantire che i criteri di progetto definiti siano soddisfatti. I criteri di progetto che possono essere definiti nel DDBD sono costituiti dai *drift* massimi ai piani, dalle richieste in termini di curvatura e dalle deformazioni residue (vedi Sullivan et al. 2012a).

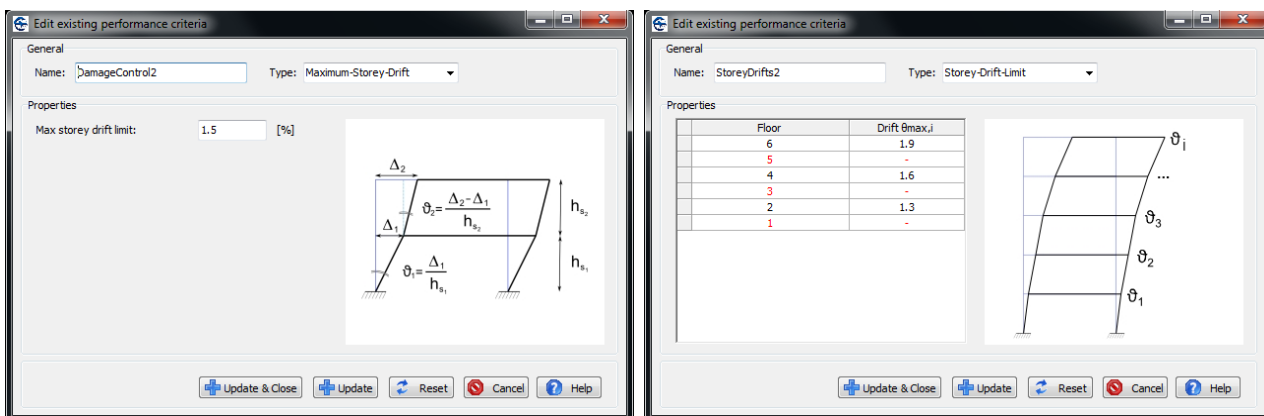


Figura 10 –Criteri di progetto: drift massimi della struttura (sinistra) e drift massimi ai piani (destra)

Nella versione corrente di DBDsoft è implementato il criterio di *drift* ai piani (assoluti e interpiano come in figura 10) che prende in considerazione le richieste in termini di limiti strutturali e non strutturali. Nelle future versioni del software saranno implementati anche i rimanenti criteri dei limiti di curvatura delle sezioni, che possono essere ottenuti dalle analisi momento-curvatura delle sezioni o utilizzando espressioni empiriche.

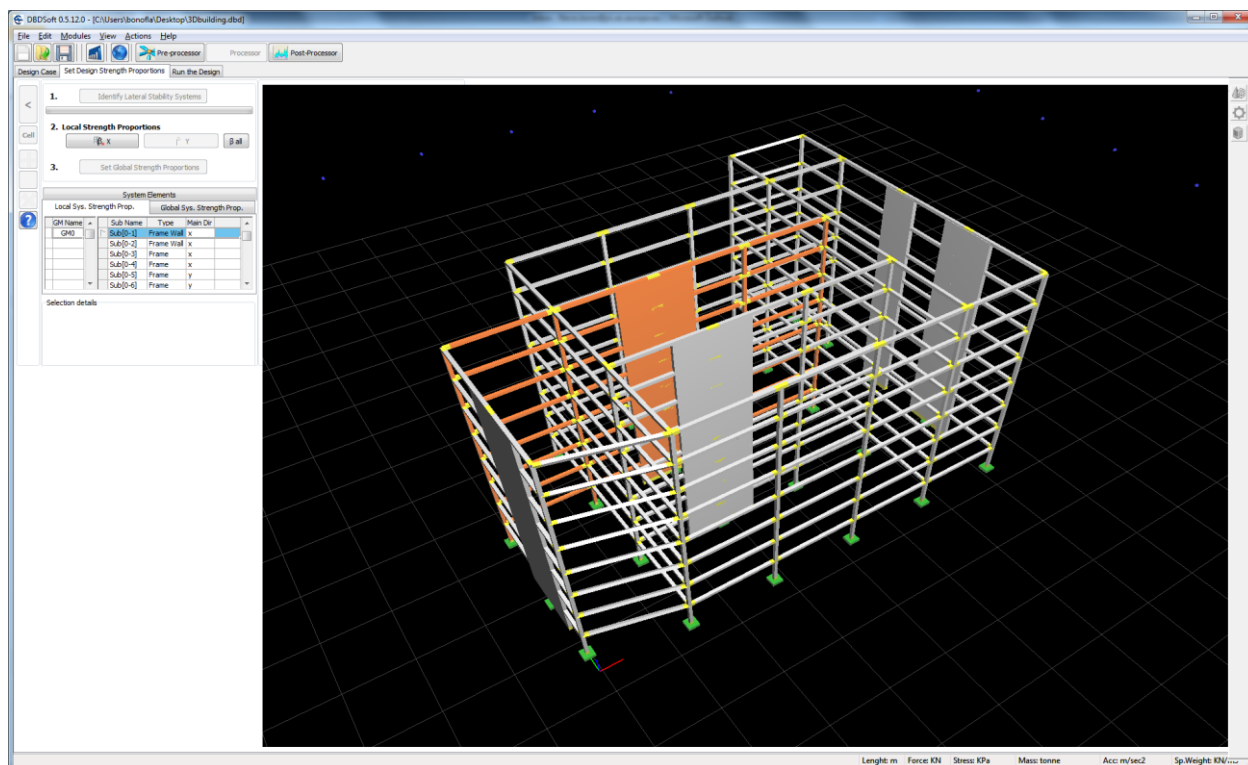


Figura 11 –Identificazione dei meccanismi resistenti di un edificio 3d in CA: il programma consente di visualizzare i singoli sottosistemi (nella figura una tipologia telaio-parete)

Identificazione del sistema di stabilizzazione laterale (lateral stability system)

Una volta definita la geometria strutturale, i vincoli, i carichi ed i criteri prestazionali, si procede alla fase di *processing* in cui il programma identifica i *meccanismi laterali resistenti* e, successivamente, consente all'utente la definizione delle proporzioni di resistenza di ciascun insieme strutturale. Il programma esegue la classificazione dei sistemi globali e dei sotto-sistemi strutturali a partire dagli elementi verticali, analizzando i collegamenti orizzontali tra di essi. Questa fase è utile per il controllo del modello strutturale e anche perché permette l'assegnazione di proporzioni differenti di resistenza per i sottosistemi individuati dal programma.

In figura 11 è visualizzata, ad esempio, la schermata del software DBDSoft dove, a seguito della classificazione di un edificio a telaio e pareti in c.a., viene evidenziato uno dei sotto-sistemi strutturali individuati costituito da una tipologia mista telaio-parete. Il programma consente la selezione di ogni singolo meccanismo laterale resistente individuato, cui viene assegnato un colore univoco, per un efficace controllo da parte dell'utente.

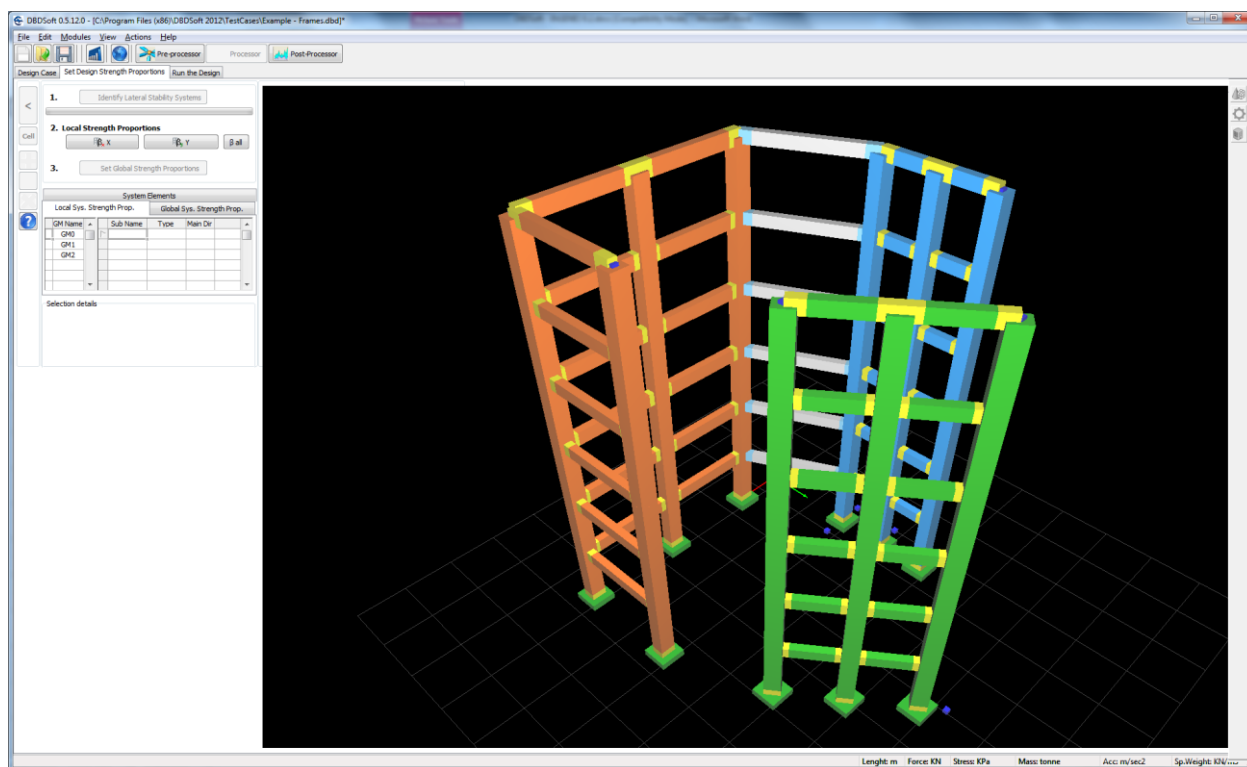


Figura 12 –Identificazione dei meccanismi resistenti di un edificio 3d in c.a.

Un altro esempio, qui riportato, è rappresentato da un edificio a telaio di sei piani come in figura 12: si possono notare tre distinti telai (visualizzati con colori differenti) identificati dal programma in base ai sistemi che contribuiscono alla risposta globale nelle due direzioni principali X e Y. Nella visualizzazione 3d della struttura viene inoltre indicata la posizione delle cerniere plastiche (in giallo in figura 12). DBDsoft dispone in automatico le cerniere plastiche, assumendo che si formino alla base di tutte le pareti, alla base di tutte le colonne ed alle estremità di tutte le travi (a condizione che non siano specificati *releases*). Se tuttavia sono definiti dall'utente *releases* alle estremità di una trave (in azzurro in figura 12) allora, il programma trascura il contributo di tale trave al meccanismo

laterale resistente (le travi in grigio di figura 12 di fatto dividono il telaio principale che viene pertanto di fatto identificato come composto da due sistemi separati: arancione e azzurro in figura 12).

Le proporzioni di resistenza nel controllo della progettazione

Probabilmente l'aspetto più innovativo di DBDsoft consiste nella possibilità di specificare le proporzioni di resistenza nella fase di *processing*. Come sopra discusso, l'uso di proporzioni di resistenza nel DDBD è utile per diversi motivi, anche se probabilmente il vantaggio principale consiste nel fornire al progettista il pieno controllo del progetto della struttura.

In DBDsoft la definizione delle proporzioni di resistenza avviene in due fasi: (i) definizione di proporzioni di resistenza *locale* e (ii) definizione di proporzioni di resistenza *globale*.

Le *proporzioni di resistenza locali* si riferiscono al rapporto tra il momento flettente di una singola cerniera plastica e la somma dei momenti flettenti di tutte le cerniere plastiche nel sotto-sistema locale (es. un telaio parte di una struttura di tipo telaio-parete) per una data direzione principale di carico. Le *proporzioni di resistenza locali* sono indicate con i simboli di β_{xx} o β_{yy} per le direzioni X e Y rispettivamente; possono essere impostate dal progettista per ottimizzare, ad esempio, le resistenze delle travi in una struttura a telaio specificando che tutte le travi allo stesso livello abbiano la stessa resistenza (e quindi lo stesso valore del coefficiente beta).

Nel caso di edifici complessi, come ad esempio strutture multipiano a telaio, è presente un elevato numero di cerniere plastiche che richiederebbero all'utente un lavoro oneroso nella definizione dei singoli valori individuali dei coefficienti beta; per questo motivo DBDsoft permette la rapida assegnazione delle proporzioni di resistenza locale in modo automatico per ciascun sotto-sistema strutturale considerando dimensioni relative delle sezioni e una distribuzione verticale della resistenza laterale auspicabile (per esempio con una resistenza al taglio maggiore alla base rispetto ai piani superiori in un telaio). Il progettista può quindi procedere a modificare i valori assegnati dove necessario lasciando inalterati i valori assegnati dal programma

Le *proporzioni di resistenza globali* si riferiscono al rapporto tra la resistenza al ribaltamento di un sotto-sistema e la somma delle resistenze al ribaltamento di tutti i sottosistemi del sistema globale per una data direzione principale (indicate con i simboli β_x o β_y per le direzioni X e Y rispettivamente). Le *proporzioni di resistenza globali* possono essere impostate dalla finestra di progettazione (figura 13) per ridurre, ad esempio, la torsione della struttura o per impiegare analoghe quantità di armatura in pareti differenti, anche se sono di lunghezza diversa (vedi sezione 2 e Priestley et al. 2007 per ulteriori chiarimenti). Il programma moltiplica internamente le proporzioni di resistenza locali e globali per ottenere le proporzioni di resistenza di progetto per ogni cerniera plastica della struttura.

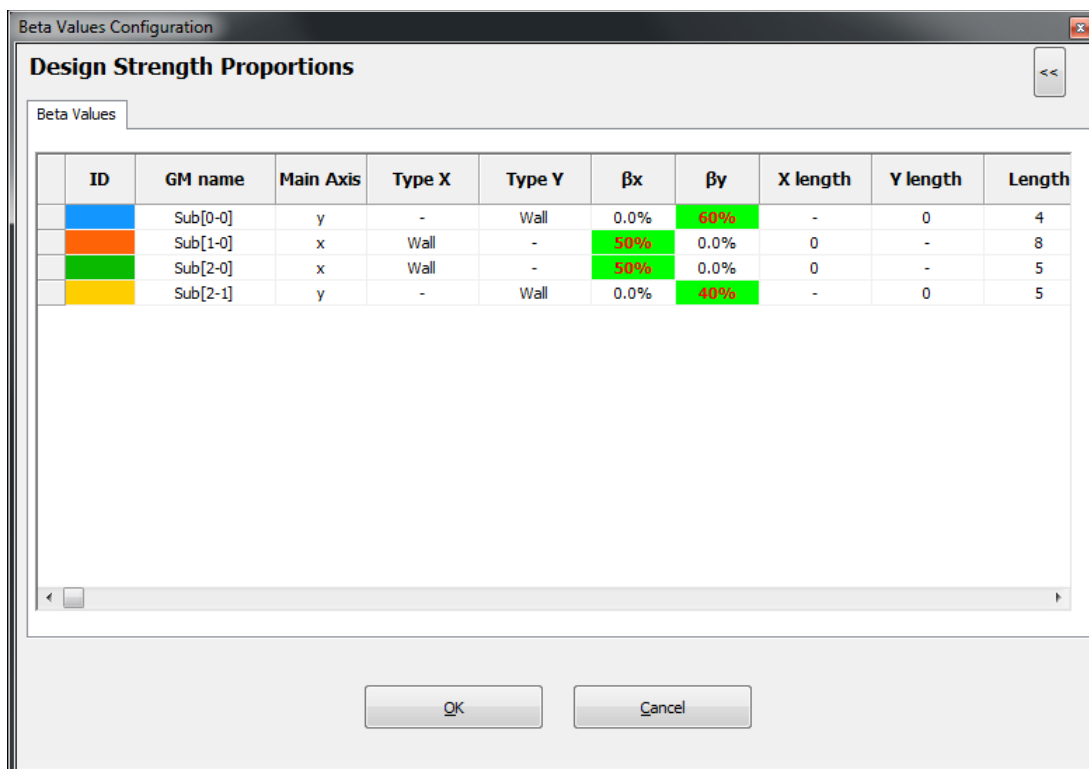


Figura 13 – Finestra per l’inserimento dei parametri beta globali nelle due direzioni X e Y (proporzioni di resistenza) di un edificio composto da tre pareti separate (GM0, GM1, e GM2).

Analisi di equilibrio

Una volta inseriti i dati strutturali (*pre-processing*) e definite le proporzioni di resistenza, l'utente può eseguire la fase di analisi (*Processing*). Il programma identifica in modo automatico il profilo di spostamento di progetto sulla base dei criteri definiti dall'utente e, successivamente, converte il sistema a più gradi di libertà (MDOF) in un sistema equivalente ad un singolo grado di libertà (SDOF). Le richieste di duttilità di ogni cerniera plastica sono calcolate e queste vengono fattorizzate mediante una procedura di lavoro svolto per ottenere la duttilità del sistema e lo smorzamento viscoso equivalente, in linea con le raccomandazioni in DBD12 (Sullivan et al., 2012a). Una volta noti lo smorzamento e lo spostamento del sistema, il programma procede a identificare il periodo effettivo dallo spettro di risposta degli spostamenti. Il valore del periodo è poi utilizzato, insieme con la massa effettiva, per calcolare la rigidità effettiva richiesta, che viene moltiplicata per lo spostamento di progetto per ottenere il taglio base della struttura equivalente.

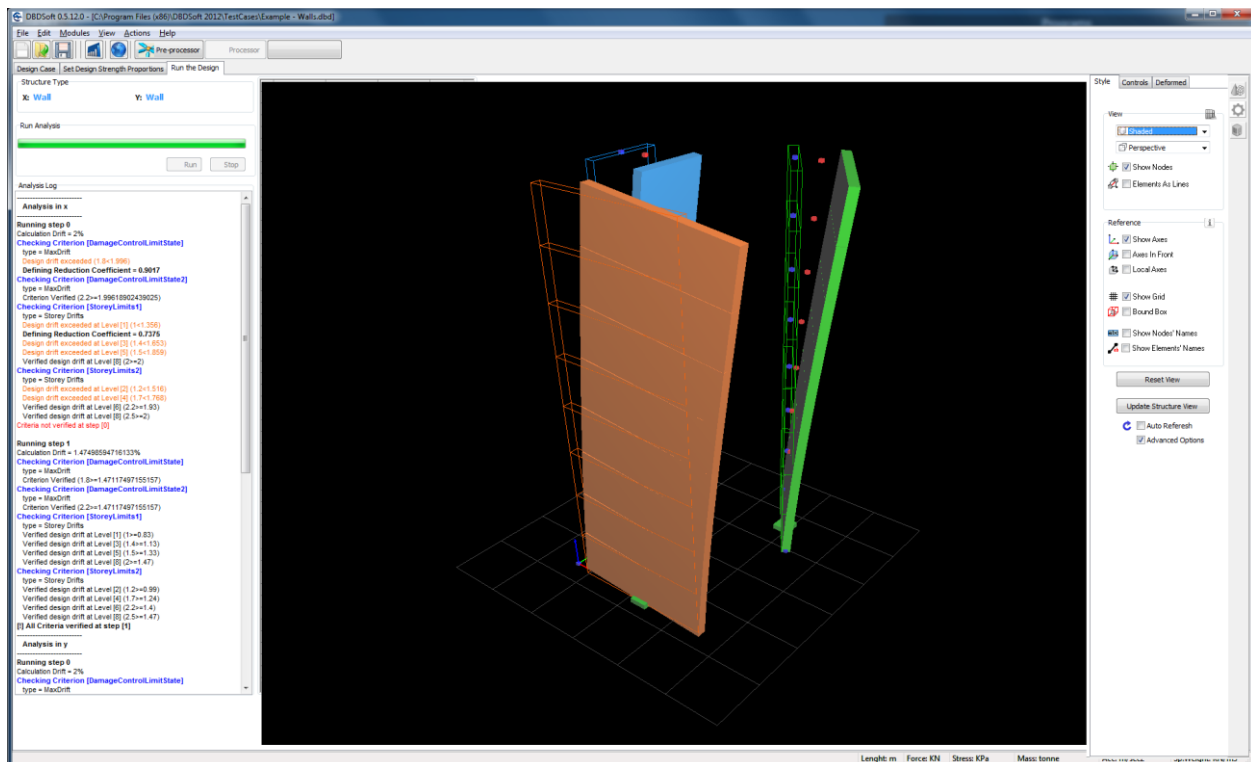


Figura 14 –Processor: nella fase di analisi vengono riportati gli step di iterazione del programma (nella colonna a sinistra) e la struttura deformata

Al fine di individuare la resistenza delle sezioni utilizzando una procedura DDBD tradizionale, il taglio alla base di progetto è distribuito per tutta l'altezza della struttura come un insieme di forze laterali equivalenti. La struttura può essere poi analizzata con tale insieme di forze laterali per ricavare le resistenze richieste delle cerniere plastiche. Nella versione attuale di DBDsoft questo elaborato processo è semplificato poiché i valori beta (definiti per essere in equilibrio con i carichi laterali esterni) indicano già una valida distribuzione delle forze interne all'interno della struttura. Pertanto la resistenza di progetto in corrispondenza delle cerniere plastiche è ricavata semplicemente dal prodotto tra il valore beta e il momento globale di ribaltamento (dato dal prodotto del taglio alla base di progetto e l'altezza del sistema SDOF equivalente). Per strutture a parete, il programma riporta le forze di taglio per tutta l'altezza delle pareti, ottenute utilizzando la distribuzione delle forze laterali equivalenti del metodo tradizionale DDBD.

Visualizzazione dei risultati (Post-Processing)

I risultati ottenuti dalla fase di Processing sono riportati in formato tabellare e in forma grafica con i diagrammi dei profili di spostamento Δ_y e Δ_d (figura 15) e dei valori di momento e taglio ai vari livelli della struttura per ciascuna delle due direzioni principali x ed y (figura 16).

Nel modulo di *Post-processing* sono inoltre riportate le informazioni riguardanti le iterazioni eseguite dal programma nella fase di analisi della struttura, indicando nel dettaglio, per ogni step di calcolo, i criteri non soddisfatti.

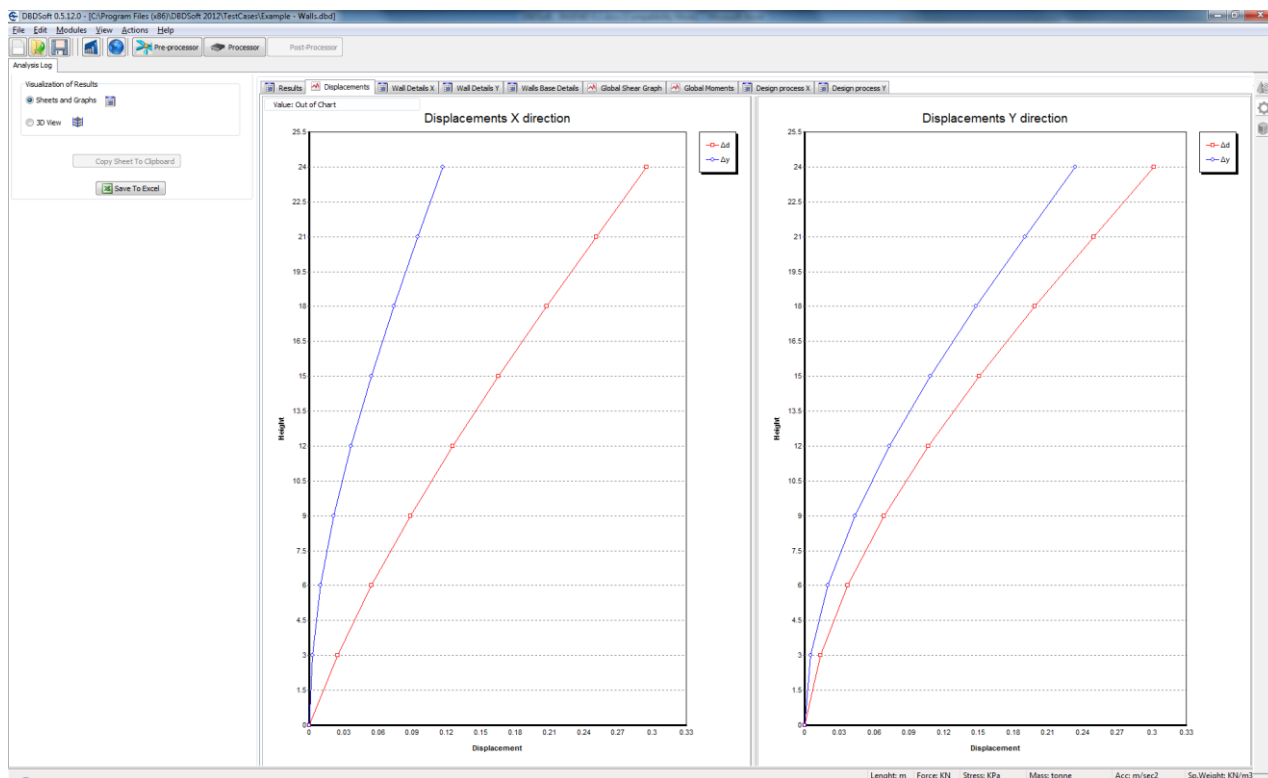


Figura 15 – Grafico dei profili di spostamento nelle due direzioni principali

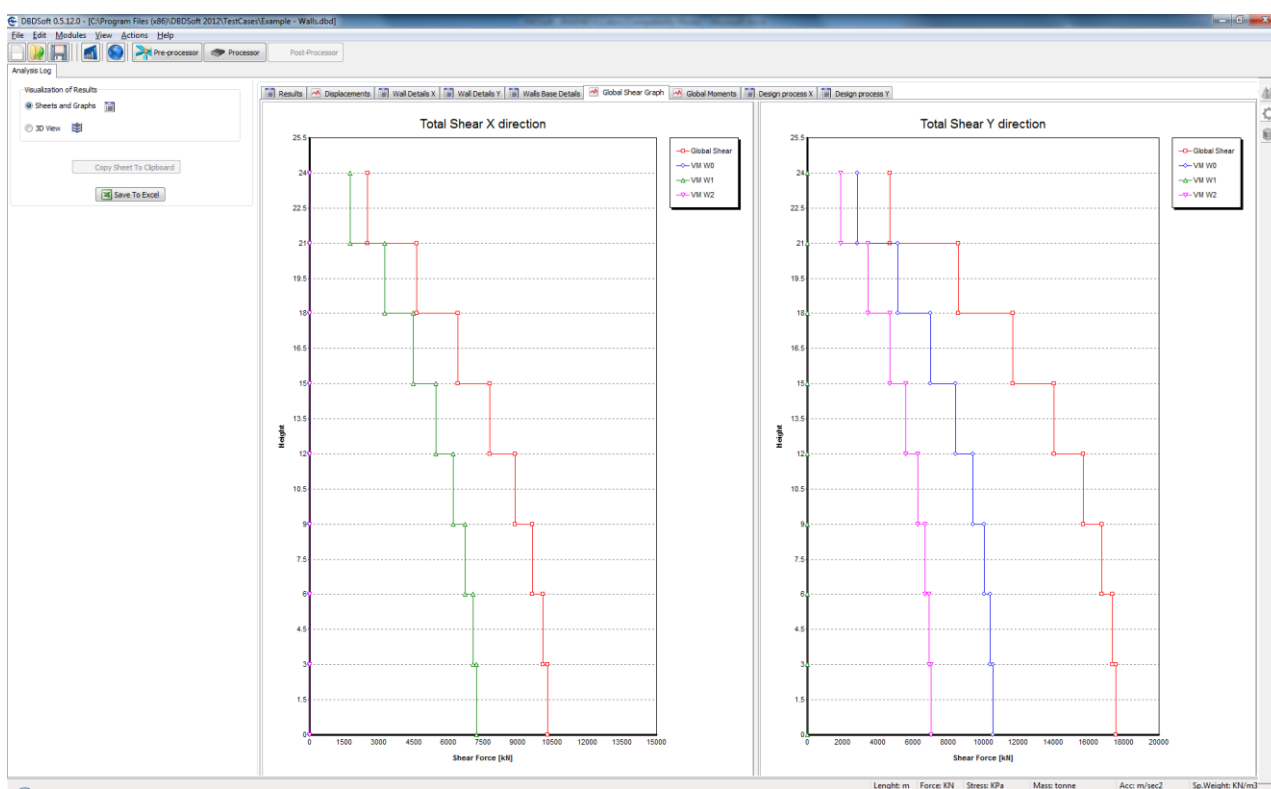


Figura 16 – Grafico delle forze di taglio a ciascun livello per i singoli sistemi resistenti nelle due direzioni principali

Criteria	Details	Defined Value	Results at process Step				
			1	2	3	4	5
DamageControlLimitState	Maximum Drift	1.8	1.9962	1.4712			
DamageControlLimitState2	Maximum Drift	2.2	1.9962	1.4712			
StoreyLimits1	Storey 1	1	1.3559	0.8309			
	Storey 3	1.4	1.6532	1.1282			
	Storey 5	1.5	1.859	1.334			
	Storey 8	2	1.9962	1.4712			
StoreyLimits2	Storey 2	1.2	1.516	0.991			
	Storey 4	1.7	1.7675	1.2425			
	Storey 6	2.2	1.9276	1.4026			
	Storey 8	2.5	1.9962	1.4712			

Figura 17 – Tabella dei criteri e risultati per due diversi step della fase di processo con evidenziati i valori eccedenti i limiti impostati

Una serie di test di verifica è stata effettuata per la versione corrente del software. In particolare, sono stati progettati un telaio regolare 3D e modelli di parete, di piani 6 e 8 rispettivamente, utilizzando il programma e i risultati sono stati confrontati con i risultati ottenuti con i calcoli manuali. Questa procedura ha dimostrato con successo che il programma esegue correttamente il progetto della struttura. Ulteriori test di verifica sono previsti su una più ampia selezione di configurazioni strutturali per la continua validazione degli aggiornamenti e delle nuove funzionalità apportati al programma.

LIMITI DELLA VERSIONE CORRENTE E RICERCHE FUTURE

La versione attuale di DBDsoft è in grado di ottenere le resistenze di progetto delle cerniere plastiche nel caso di edifici regolari a telaio e/o parete in c.a. con uno sviluppo verticale medio-basso. Il programma non implementa ancora la procedura per i sistemi telaio-parete doppia o sistemi accoppiati a parete. Il programma non consente, al momento, l'impiego di sezioni a U, a T o altre sezioni c.a. dalla forma irregolare o analoghe configurazioni di pareti. Edifici con notevole irregolarità in pianta o in elevazione non possono essere progettati utilizzando la versione corrente del software. Inoltre il programma presuppone una risposta rigida della fondazione e pertanto non dovrebbe essere utilizzato per sistemi con fondazioni deboli o flessibili o sistemi in cui potrebbe essere presente una significativa interazione terreno-struttura.

Gli effetti dei modi superiori e i requisiti di *capacity design* non sono inseriti nel programma e potrebbero essere considerati separatamente dal progettista successivamente ad un'applicazione del software. La ricerca futura considererà l'utilizzo dell'analisi degli autovalori, che potrebbe essere eseguita al termine di una procedura DDBD, per tener conto degli effetti degli alti modi sia sulle forze (per *capacity design*) sia sulle deformazioni (per un DDBD nell'ambito di una procedura iterativa all'interno del software). Inoltre, nelle versioni future del software, si cercherà di consentire l'inserimento, da parte dell'utente, dei valori probabili di sovrarresistenza dei materiali che, insieme con i contributi degli alti modi, consentono la valutazione delle forze di *capacity design*.

Tutte le limitazioni di cui sopra dovrebbero essere eliminate in tempi relativamente brevi, grazie ad un continuo lavoro di ricerca che ha l'obiettivo di aumentare il campo di applicazione del software DBDSoft ed estenderlo ad altre configurazioni strutturali e maggiori tipologie di materiali

CONCLUSIONI

Un progetto di ricerca italiano ha consentito la realizzazione di un programma per computer denominato DBDSoft per la progettazione sismica di edifici regolari telaio e parete in cemento armato con il metodo diretto DBD. Lo sviluppo del programma ha richiesto l'implementazione di un nuovo approccio concettuale rispetto ai programmi tradizionali di analisi strutturale. In particolare la rigidità degli elementi non è nota all'inizio della procedura e pertanto un programma di progettazione non potrebbe utilizzare un approccio tradizionale. Inoltre, poiché è stato riconosciuto che per una data configurazione strutturale esistono diverse soluzioni di progettazione sismica valide, i progettisti devono poter essere liberi di indirizzare la progettazione sismica verso la soluzione che meglio soddisfa le diverse esigenze progettuali.

Per superare queste sfide il programma DBD adotta un approccio innovativo in cui progettisti possono assegnare le proporzioni di resistenza e le posizioni delle cerniere plastiche nella fase iniziale di progettazione all'interno del programma. Questa procedura di assegnazione delle proporzioni di resistenza fornisce al progettista un controllo rapido ed efficace sulla soluzione di progettazione finale e consente di eseguire un'analisi di equilibrio invece di un'analisi basata sulla rigidità.

Oltre alla definizione delle proporzioni di resistenza, il programma richiede di definire unicamente dati strutturali standard; una volta inserite le informazioni sulla struttura, il software identifica internamente il profilo di spostamento di progetto, sulla base dei criteri definiti dall'utente. Il software converte la struttura MDOF in un sistema SDOF equivalente per ottenere il taglio di base di progetto utilizzando la procedura standard DDBD; in seguito è eseguita l'analisi di equilibrio per identificare la resistenza necessaria in corrispondenza delle cerniere plastiche.

Il programma, allo stato attuale, consente la progettazione di strutture regolari a telaio o a parete a sezioni rettangolare. Il progresso della ricerca nel campo DBD richiede l'implementazione di nuove funzionalità e l'ampliamento del campo di applicazione alle diverse tipologie strutturali; per tali motivi l'attività di sviluppo di DBDSoft è ancora attiva e il rilascio di nuove versioni garantisce un costante aggiornamento.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è frutto del progetto esecutivo e4, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana. EUCENTRE desidera ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile per il sostegno a questo progetto. Inoltre, gli autori ringraziano Fabrizio Magni, Rui Pinho e Francesco Giordano per i loro contributi e suggerimenti durante lo sviluppo del software.

BIBLIOGRAFIA

Maley, T.J., Sullivan, T.J., Pampanin, S. (2012). Seismic Design of Mixed MRF Systems, IUSS Press, Pavia, Italy.

Paulay T. (2002). A displacement-focused Seismic Design of Mixed Building Systems. *Earthquake Spectra* 18:4, 689-718.

Priestley, M.J.N. (1993). Myths and Fallacies in Earthquake Engineering – Conflicts Between Design and Reality *Bulletin of the NZ National Society for Earthquake Engineering, New Zealand*, 26:3, 329-341.

Priestley, M.J.N, Calvi, G.M., and Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy.

Seismosoft (2012). *SeismoStruct - A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*, available from URL: <http://www.seismosoft.com>.

Sullivan, T.J., Bono, F., Magni, F., Pinho, R., and Calvi, G.M. (2012) – ‘Development of a Computer Program for Direct Displacement-Based Design’, 15 WCEE Lisbon

Sullivan, T.J., Calvi, G.M., Priestley, M.J.N. and Kowalsky, M.J. (2003). The limitations and performances of different displacement based design methods, *Journal of Earthquake Engineering*, 7:SI1, pp201-241.

Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N. and Calvi, G.M., (2005). Development of an innovative seismic design procedure for frame-wall structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 9:SI2.

Sullivan, T.J. Priestley, M.J.N., and Calvi, G.M., Editors (2012a). *A Model Code for the Displacement-Based Seismic Design of Structures*, DBD12, IUSS Press, Pavia, Italy.

Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N. and Calvi, G.M., (2010). Introduction to a Model Code for Displacement-Based Seismic Design, in *Advances in Performance-Based Earthquake Engineering*, Edited by Fardis M., Springer, pp.137-148.