



Centro Internazionale di Aggiornamento Scientifico

NORME TECNICHE, NOVITÀ E APPLICAZIONE NELLA DIAGNOSI DELLE STRUTTURE

BOLZANO, VENERDÌ 10 DICEMBRE 2010

**METODOLOGIE ED ESEMPI DI ANALISI NUMERICA PER LA DIAGNOSI STRUTTURALE
SECONDO LE NUOVE NORME TECNICHE**

Dott. Ing. Daniele Schiavazzi

EnginSoft S.p.A.
Via del Giambellino, 7
35129 PADOVA
tel. 049.7705311
www.enginsoft.it



1. Introduzione

La presente nota si propone come scopo di illustrare, attraverso estratti normativi, elementi di teoria della modellazione numerica ed esempi applicativi di calcolo, alcune considerazioni sul ruolo giocato dalla **simulazione al computer nella diagnosi strutturale**. Il riferimento normativo è preciso e consta nella recente opera di aggiornamento e razionalizzazione della normativa tecnica nazionale per il calcolo strutturale sfociata nella pubblicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al DM14/01/2008 (nel seguito NTC2008) e nel relativo documento di applicazione redatto dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Tali documenti, sulla scia di un processo di rinnovamento normativo iniziato nei primi anni del nuovo secolo, introducono i concetti della moderna analisi agli stati limite e portano, di fatto, la normativa vigente al livello delle più moderne norme europee ed internazionali. Alcuni dei principali nuovi concetti introdotti, ad esempio la duttilità delle strutture in campo sismico, fanno preciso riferimento a quantità che sono, in generale, di difficile determinazione mediante calcoli manuali, garantendo, ai metodi numerici di simulazione al computer, una sempre maggiore diffusione nell'ambito della professione di Ingegnere.

Altro aspetto a cui interessa attenersi è quello legato alle strutture esistenti.

Nel seguito verrà dato spazio all'utilizzo di modelli di calcolo per lo svolgimento delle analisi strutturali di crescente complicazione, da semplici analisi statiche equivalenti per le quali è possibile condurre calcoli manuali di comparazione, alle più complesse nel dinamico transitorio non lineare o di comportamento per scenari di incendio. In particolare ci si soffermerà sulle seguenti tipologie di analisi:

- **Analisi statica equivalente.** Esempio di valutazione dell'impatto sismico su di un semplice edificio appartenente al patrimonio artistico e culturale.
- **Analisi dinamica lineare.** Esempio di adeguamento sismico per un edificio in acciaio ad uso produttivo progettato negli anni '60-'70.
- **Analisi statica non lineare.** Discussione ed esempi circa le caratteristiche salienti di un solutore non lineare in grado di svolgere in modo soddisfacente tale tipologia di analisi, con particolare riferimento al trattamento delle caratteristiche di non linearità dei materiali e di algoritmi di controllo del passo di carico per analisi incrementali.
- **Analisi dinamica non lineare.** Esempio di applicazione di isolatori sismici ad un ponte stradale sull'autostrada Salerno-Reggio Calabria.
- **Analisi prestazionale al fuoco delle strutture.** Esempio relativo al comportamento di una galleria in cemento armato.
- **Analisi parametrica per strutture prodotte in serie.** Ottimizzazione strutturale e costituzione di sistemi esperti tramite superfici di risposta.

2. Approccio statico equivalente

L'approccio statico equivalente permette di cogliere il comportamento sismico di una limitata classe di strutture (quelle definite "regolari" o il cui comportamento dinamico è ben descritto da un sistema SDOF); esso riveste un' utilità centrale per i seguenti motivi:

- Costituisce la base per la comprensione di sistemi di complessità maggiore, in cui un numero significativo di modi viene coinvolto nella risposta dinamica globale.
- Per semplici edifici, tenendo eventualmente in conto in modo esplicito l'effetto torsionale indotto dal sisma, consente di fare delle valutazioni semplificate preliminari che



permettano una quantificazione dell'onere di adeguamento. Senza l'ausilio di complessi strumenti informatici è quindi possibile ottenere una serie di informazioni preliminari di accuratezza comparabile a quella della conoscenze sui materiali costituenti, qualora, per varie ragioni, non sia disponibile una accurata campagna di rilievi o indagini sperimentali.

A tal proposito, viene riportato un semplice esempio di valutazione preliminare della vulnerabilità sismica per un edificio residenziale in muratura.

2.1 Metodologia e limiti di applicabilità

2.1.1 Regolarità strutturale

Il concetto di regolarità strutturale consta in un insieme di regole normative che devono essere soddisfatte dalla struttura oggetto di studio. Tali regole riguardano sia l'ingombro della struttura nel suo complesso sia la presenza di significative variazioni di rigidezza in pianta o elevazione. Da un punto di vista dinamico, le regole di cui sopra mirano ad un veloce e preliminare riconoscimento di quelle strutture la cui oscillazione è ben descritta considerando unicamente la forma modale principale (quella con il maggiore fattore di partecipazione modale di massa).

2.1.2 Approccio metodologico

Gli effetti del sisma possono essere studiati linearmente, con carichi statici equivalenti applicati all'altezza di ciascun piano.

Le ipotesi fondamentali sul comportamento strutturale risultano essere le seguenti:

1. Il comportamento meccanico della struttura **deve essere lineare**. Non è quindi possibile lo studio del comportamento in condizioni sismiche per strutture che presentino una variazione significativa di rigidezza nel regime di spostamenti oggetto di studio né risulta possibile lo studio della redistribuzione delle azioni interne a seguito di meccanismi elasto-plastici.
2. Il comportamento dinamico della struttura deve essere tale da poter essere identificato con quello di un sistema **SDOF a singola frequenza dominante**. Tale caratteristica è tipica dei sistemi strutturali "regolari" secondo la definizione riportata nella normativa di riferimento.

E' possibile delineare nei seguenti punti una procedura per l'esecuzione dell'analisi sopra descritta:

1. Scelta della direzione di azione del sisma.
2. Determinazione dello spettro di progetto per la costruzione considerata.
3. Individuazione del periodo fondamentale della struttura, utilizzando formule a carattere forfaitario indicate dalla norma, ovvero con un procedimento automatico di calcolo.
4. Determinazione dell'ordinata spettrale per la struttura relativamente al suo periodo fondamentale.
5. Il taglio totale sismico alla base può essere individuato moltiplicando la massa sismica (strutturale e non strutturale) per l'ordinata spettrale determinata al punto 4.
6. Rimane l'onere di distribuire, con l'altezza, il taglio totale in modo da simulare una distribuzione verosimile di forze interne. Scelta ordinaria per edifici non troppo flessibili è quella di avere una distribuzione lineare crescente con l'altezza.

7. Una volta assegnate ad ogni piano le forze statiche equivalenti all'azione sismica (e la cui somma risulta uguale al taglio totale alla base), una soluzione lineare statica offre il campo interno di sollecitazione per la direzione sismica selezionata al punto 1.

2.2 Esempi semplici di utilizzo: beni del patrimonio artistico o paesaggistico

L'esempio proposto riguarda una costruzione in muratura oggetto di adeguamento sismico. Viene riportata una semplice metodologia statica equivalente per la valutazione del rischio sismico cui la costruzione risulta soggetta. La seguente figura illustra la distribuzione dei maschi murari resistenti ai vari orizzontamenti.

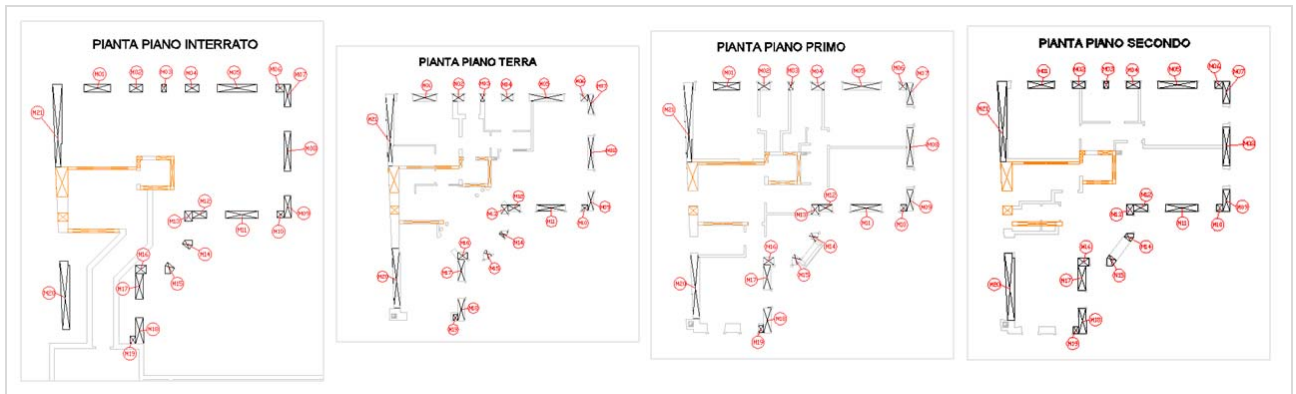


Figura 1 – Maschi murari considerati resistenti per la valutazione del rischio sismico dell'edificio allo studio.

La procedura presentata viene illustrata all'interno della *Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 12 Ottobre 2007 - Direttiva per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*. Essa si articola nei seguenti punti:

- Caratterizzazione delle caratteristiche amplificative del terreno di fondazione.
- Definizione dei livelli di conoscenza relativi ai particolari costruttivi e allo stato di conservazione dei materiali.
- Valutazione delle caratteristiche statiche dei maschi murari resistenti ai vari piani della costruzione.
- Valutazione della distanza tra centri di massa e rigidità; coefficienti di irregolarità in pianta e di omogeneità in resistenza e rigidità dei maschi murari.
- Determinazione delle forze minime di rottura per taglio ai vari orizzontamenti della costruzione.
- Determinazione dell'indice di sicurezza sismica come dalla seguente espressione:

$$I_S = \frac{\alpha_{SLU}}{\gamma_I \cdot S \cdot \alpha_g}$$

3. Ordini di modellazione

Le possibilità in termini di modellazione con gli strumenti di analisi numerica disponibili sul mercato sono limitati dai seguenti fattori:

- Fantasia e capacità dell'utente di cogliere il comportamento strutturale o lo schema di funzionamento statico di una struttura o di un suo elemento.



- Limite hardware per modelli di grandi dimensioni con particolare riferimento alla **tipologia di analisi** ed al **numero di gradi di libertà** per il modello di calcolo.
- Giustificazione economica delle analisi strutturali.

Le librerie di elementi normalmente disponibili in un codice di calcolo (Beam, Plate, Brick, Links) offrono notevoli possibilità circa la simulazione di sistemi reali. Interessa evidenziare che non tutte le scelte di modellazione risultano equivalenti o ugualmente percorribili. Alcuni dei fattori a cui occorre porre attenzione prima dell'esecuzione di un modello sono:

- Modello che possa cogliere gli effetti locali di dettaglio o gli effetti globali della costruzione.
- **Onere di post-processamento dei risultati.** In particolare alcuni ambiti di verifica prediligono l'ottenimento di sollecitazioni integrate di difficile estrazione con modelli continui bi o tri-assiali (es. modello Plates o Bricks).

Altro concetto su cui interessa soffermarsi: non è assolutamente detto che un unico modello di calcolo esaurisca la curiosità statica del progettista.

4. Approccio dinamico lineare

L'approccio dinamico lineare può essere considerato quello a maggiore popolarità data la generalità dei casi trattati. Le ipotesi fondanti risultano essere le seguenti:

1. **Linearità di comportamento.** Tale ipotesi segue con necessità dal fatto che il procedimento di soluzione viene sviluppato nello spazio delle frequenze, le quali vengono calcolate a rigidità costante.
2. **Piccolo smorzamento.** Anche tale ipotesi deriva dall'utilizzo delle frequenze naturali non smorzate. Tale approccio viene seguito nella quasi totalità dei programmi di calcolo commerciali. Sono possibili comportamenti peculiari in questo senso.
3. **Accelerazione costante.** Il sisma viene simulato attraverso l'applicazione ai singoli modi di un'accelerazione costante. Il fattore di partecipazione modale di massa per forme modali antisimmetriche risulta conseguentemente di piccola entità.

Il procedimento riportato in precedenza per l'analisi statica equivalente viene qui generalizzato per ognuno dei modi significativi di oscillazione, e cioè per quelli tali da garantire una massa partecipante almeno pari all'85%, valore usualmente accettato dalla normativa vigente.

Il procedimento risolutivo può essere così riassunto:

1. **Determinazione** dei modi propri della struttura, fino ad includere almeno l'85% delle masse per ciascuna direzione sismica oggetto di studio.
2. Per **ciascun** modo viene applicata un'accelerazione pari all'ordinata spettrale corrispondente al proprio periodo.
3. Le **single** risposte modali (equilibrate) devono essere combinate per fornire la risposta globale della struttura.

Mentre i punti 1 e 2 non creano difficoltà di sorta, la combinazione dei risultati relativi ai singoli modi **vanifica ogni considerazione di equilibrio e congruenza**. Tale combinazione può avvenire nella seguente modalità:

Combinazione quadratica completa (CQC). In questo caso l'effetto dell'interazione tra frequenze viene considerato offrendo una generalizzazione rispetto alla metodologia SRSS. Si utilizza la seguente espressione:



$$R_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_1} R_i \cdot R_j \cdot \rho_{ij}}$$

dove ρ_{ij} è un opportuno coefficiente che dipende dallo smorzamento.

Se le frequenze del sistema risultano sufficientemente spaziate, i risultati relativi alle combinazioni SRSS e CQC vanno a coincidere.

4.1.1 Considerazioni sui risultati di un'analisi dinamica lineare sismica

I risultati sopra descritti, derivanti da combinazioni di risultati modali SRSS ovvero CQC, **non rispettano**, in generale, le condizioni di equilibrio e congruenza. Per rendersene conto è sufficiente osservare che, vista la presenza della radice quadrata nell'operatore di combinazione, tutti i risultati sono positivi.

Le verifiche di correttezza della soluzione saranno quindi maggiormente agevoli sulle singole soluzioni modali, derivate dall'equazione del moto per una accelerazione costante in ingresso.

4.2 Esempio di rinforzo di costruzione in acciaio

4.2.1 Descrizione della costruzione

La struttura ha una lunghezza in pianta di 60 m ed una larghezza pari a 16 m. E' costituita da 13 telai piani in acciaio disposti paralleli gli uni agli altri a una distanza di 5.0 m e collegati da due livelli di travi orizzontali. I primi 10 dei 13 telai costituiscono la struttura portante della porzione denominata "Sala Cabina Elettrica" mentre gli altri costituiscono quella chiamata "Sala Personale". La zona della "Cabina Elettrica" presenta un piano a livello 0.0 e un orizzontamento a quota +2.15 m. La porzione del fabbricato denominata "Sala Personale" è composta da due piani, uno a quota +0.0 m mentre il secondo a quota +3.83 m. Longitudinalmente (direzione globale X del modello di calcolo), sui lati esterni (Filo A e filo D), tra i telai 1 e 2, 4 e 5, 6 e 7, 8 e 9, 9 e 10 sono presenti dei sistemi di controvento che interessano o il primo dei due piani oppure l'intera altezza dell'edificio. Trasversalmente, invece, la struttura ha uno schema strutturale prevalentemente a telaio e presenta elementi controventanti unicamente in corrispondenza dei telai 6 e 7. La seguente figura illustra una vista d'insieme della struttura di acciaio in elevazione e della struttura di fondazione.

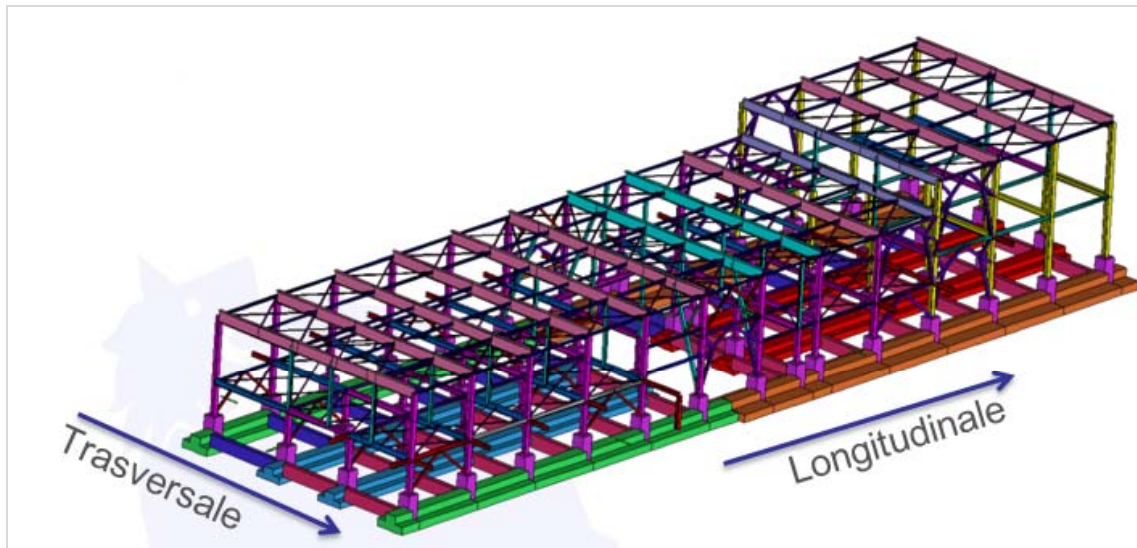


Figura 2 - Struttura del fabbricato oggetto di studio.

4.2.2 Importanza del fattore di struttura

La progettazione originale dell'edificio viene condotta a telai indipendenti. Ciò comporta una significativa differenza di duttilità:

- In senso trasversale il comportamento a telaio assicura una soddisfacente duttilità confermata dalle tipologie di collegamento trave-colonna.
- In senso longitudinale il numero limitato dei controventi limita la possibile escursione in campo plastico durante l'evento sismico.

Un'analisi non lineare statica (o di "pushover") può essere utilizzata per una caratterizzazione della duttilità nelle due direzioni. Il differente fattore di struttura in senso longitudinale comporta un aumento significativo delle forze sismiche sulla costruzioni che cambia drasticamente l'esito delle verifiche per le membrature, i giunti, le fondazioni.

4.2.3 Verifiche in stato di fatto della costruzione

La verifica in stato di fatto viene condotta sulle seguenti componenti:

- Resistenza e stabilità delle membrature.
- Verifica delle unioni tra membrature, unioni a terra

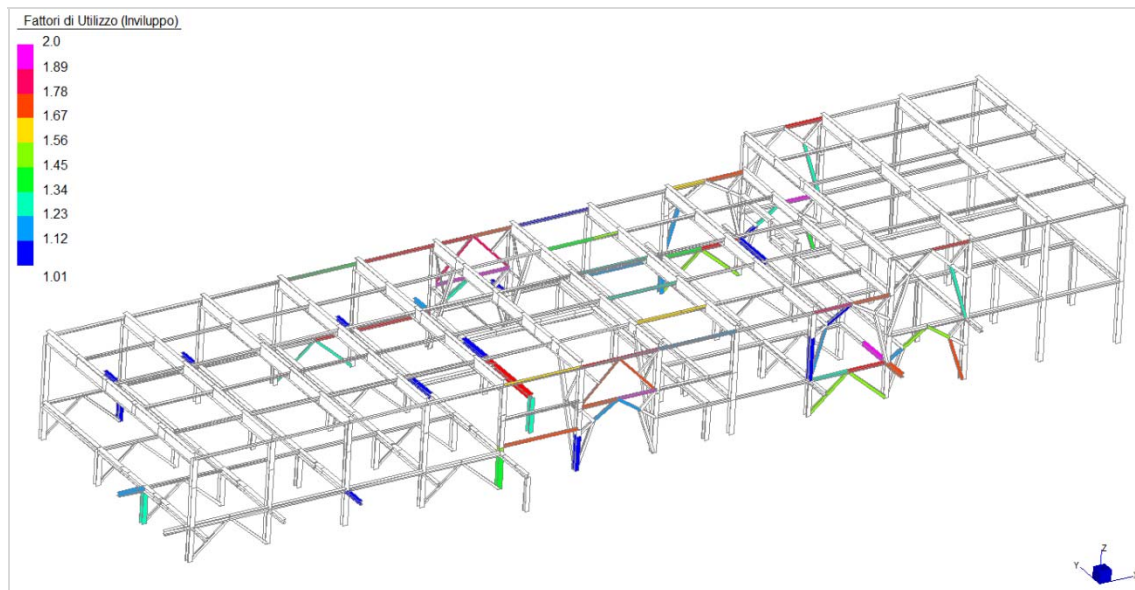


Figura 3 - Distribuzione dei fattori di utilizzo a stabilità delle membrature nella configurazione pre-intervento.

4.2.4 *Intervento iterativo di adeguamento sismico*

Una volta verificate le carenze strutturali della costruzione nella sua configurazione di stato di fatto si sono analizzate le possibili distribuzioni di rinforzo. Risulta evidente la necessità di aggiungere elementi di controvento che possano diminuire le forze agenti sui controventi esistenti che sono eccessive sia per il tipo di membratura utilizzata che per il collegamento di estremità. La scelta relativa all'ubicazione e alla conformazione degli elementi addizionali di controvento è dipesa dai seguenti fattori:

- Scelta di un tipo di controvento che non crei delle maggiorazioni di sforzo sulle membrature esistenti.
- Scelta di una conformazione di controvento a croce esteso in due campate successive, in modo da avere delle ricadute inferiori in termini di forze verticali sulle travi rovesce di fondazione.
- Scelta di una ubicazione che minimizzi il disturbo per il personale che lavora nell'edificio.
- Essendo il controvento a croce generalmente più rigido di un controvento a K, l'assenza di un piano rigido nella zona di installazione facilita un passaggio graduale delle forze orizzontali da sisma.
- Le scelte progettuali tengono naturalmente in conto il minor onere complessivo delle attività svolte in officina rispetto a quelle di cantiere.

Le seguenti immagini illustrano alcune delle tipologie di rinforzo studiate.

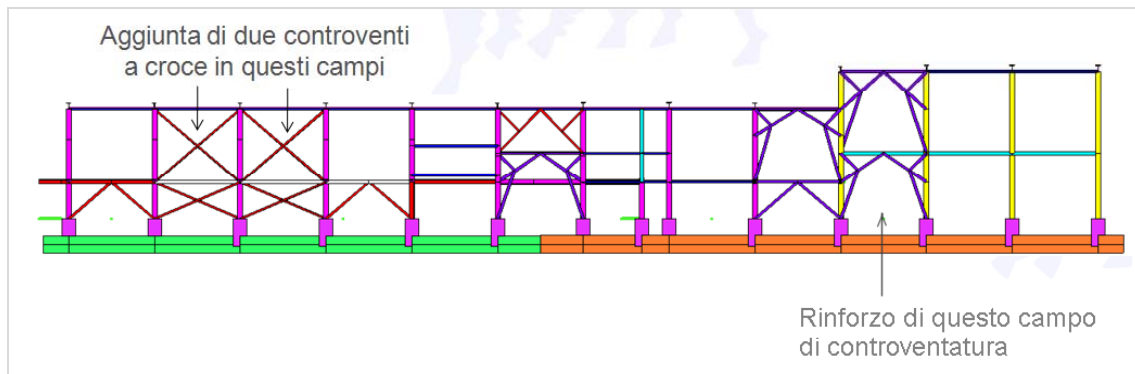


Figura 4 - Prima configurazione di rinforzo di tentativo.

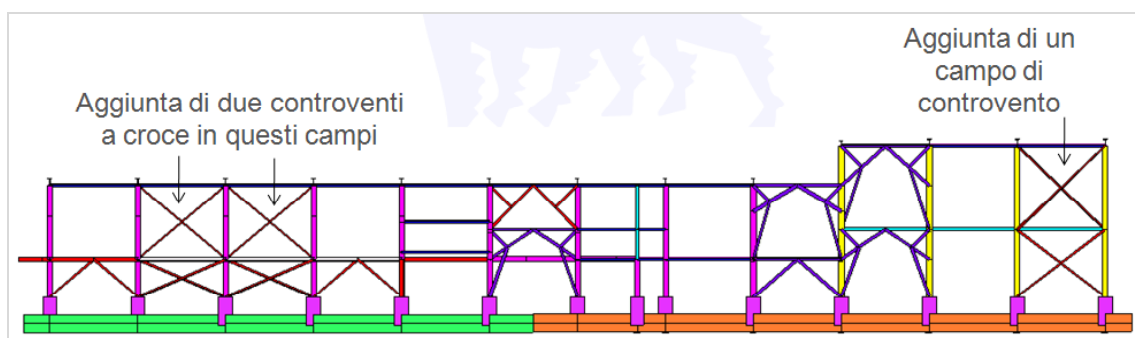


Figura 5 - Altra configurazione di rinforzo di tentativo.

5. Approccio statico non lineare

Le ultime revisioni normative nazionali hanno introdotto una nuova possibilità relativa all'analisi del comportamento di una struttura sotto l'effetto del sisma.

Essa risulta concettualmente e operativamente piuttosto differente dalle altre tipologie permesse:

- L'attenzione primaria passa dal livello sollecitativo, agli **spostamenti massimi** che la struttura subisce durante l'evento sismico.
- Viene dato largo spazio all'utilizzo di **tecniche non lineari di simulazione numerica**, che consentano di rappresentare il percorso strutturale generato da una distribuzione di spinta crescente agente sulla costruzione. La curva che rappresenta la variazione di taglio alla base della struttura diagrammata contro lo spostamento del baricentro dell'ultimo piano viene denominata "curva di push-over".
- Il comportamento dedotto a partire dalla suddetta curva serve a determinare un sistema ad un grado di libertà **bi-lineare equivalente** attraverso il quale viene valutato lo spostamento massimo che la struttura subisce durante il terremoto.
- La valutazione del rischio sismico avviene verificando che, nel raggiungimento dello spostamento massimo sopra definito, la struttura non presenti meccanismi globali o locali di rottura fragile e fenomeni di esaurimento delle doti di duttilità.

L'analisi statica non lineare riveste una certa importanza anche nella valutazione delle doti di duttilità degli edifici. Nel caso di nuova costruzione il fattore di struttura viene solitamente selezionato sulla base di precisi meccanismi resistenti ai carichi orizzontali. Scopo della progettazione diviene quindi anche l'aderenza del comportamento reale agli schemi scelti. Il caso delle costruzioni esistenti è invece più delicato. Colui che progetta l'intervento di



adeguamento deve poter giustificare l'assunzione fatta circa il fattore di struttura da cui dipende la riduzione dello spettro di progetto e quindi delle forze orizzontali in una logica dinamica lineare di analisi.

Si riporta inoltre quanto affermato nelle Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008: "Questo metodo d'analisi è utilizzabile solo per costruzioni il cui comportamento sotto la componente del terremoto considerata è governato da un modo di vibrare naturale principale, caratterizzato da una significativa partecipazione di massa."

5.1 Analisi di push-over

Lo svolgimento di un'analisi di push-over e la determinazione dell'omonima curva rivestono un ruolo predominante per lo svolgimento dell'analisi non lineare statica. Nella maggior parte delle situazioni pratiche la complessità insita nella configurazione strutturale e la descrizione del comportamento dei materiali in fase post-elastica, rendono obbligatorio il ricorrere a codici di calcolo automatico. Nella scelta di un solutore adeguato e flessibile per lo svolgimento di analisi non lineari generiche e di push-over in particolare, i seguenti fattori risultano determinanti:

- **Schematizzazione delle non linearità post-elastiche dei materiali componenti.** La scelta del tipo di elemento (Beam, Plate, Brick) riveste una significativa importanza; da esso dipendono le quantità attraverso le quali definire degli opportuni modelli costitutivi. Utilizzando elementi Plate o Brick, diviene infatti normale l'inserimento di legami non lineari attraverso curve tensione-deformazione oppure attraverso criteri di resistenza sempre definiti in termini tensionali. Gli elementi Beam consentono maggiore libertà da questo punto di vista, potendo gestire modelli diffusi di plasticità (plasticità a fibre con integrazione automatica del legame tensione-deformazione in tutti i punti della sezione trasversale) oppure modelli concentrati nei quali la curva di comportamento viene definita in termini di sollecitazioni e spostamenti generalizzati (ad es. relazioni momento-curvatura, momento-rotazione, ecc.).
- **Schematizzazione delle non linearità geometriche.** In questo caso l'equilibrio della struttura viene condotto nella configurazione deformata e vengono inoltre considerati gli effetti di accoppiamento tra gli stati membranali agenti e la rigidità flessionale dei componenti della struttura. Soprattutto nelle fasi avanzate di carico per le analisi di push-over, il percorso strutturale può dipendere fortemente dall'inclusione o meno di tale tipo di non linearità.
- **Algoritmi di scelta del passo di carico a controllo di spostamento.** L'evoluzione della rigidità strutturale durante il processo progressivo di spinta orizzontale, in presenza di non linearità geometrica, o fenomeni di instabilità a scatto (spinta verticale progressiva per ponti ad arco ribassato) possono portare a tratti di "softening" nel percorso strutturale. Risulta evidente come sia impossibile seguire questi andamenti con algoritmi di riduzione del passo di carico a controllo di forza. Logiche di tipo "Arc Length" diventano quindi vincenti per riuscire a studiare il comportamento della costruzione in presenza di grandi spostamenti orizzontali.
- **Spinta adattativa.** Le distribuzioni di spinta che vengono utilizzate nell'ambito di una analisi di push-over possono essere determinate mediante criteri di uniformità oppure di similitudine al modo fondamentale di oscillazione. Durante la fase di spinta, con il progressivo formarsi di zone con deformazioni plastiche è possibile che la rigidità della struttura presenti significative variazioni tali da alterare i modi fondamentali di vibrazione.

In tale caso la distribuzione spaziale di spinta può essere alterata durante l'analisi di push-over in considerazione di quanto detto sopra.

L'esempio di seguito riportato aiuta a comprendere come, anche per un semplice telaio piano in acciaio, sia importante eseguire simulazioni con codici che possano vantare almeno le prime tre caratteristiche sopra citate.

5.1.1 Un semplice esempio di analisi di push-over su telaio di acciaio

L'esempio proposto viene ripreso da un articolo di F.M. Mazzolani e V. Piluso ove è analizzato un semplice telaio piano con travi e colonne atte a generare un meccanismo duttile di collasso. La schematizzazione numerica presentata determina una curva di push-over che riproduce in modo fedele quella presentata nell'articolo.

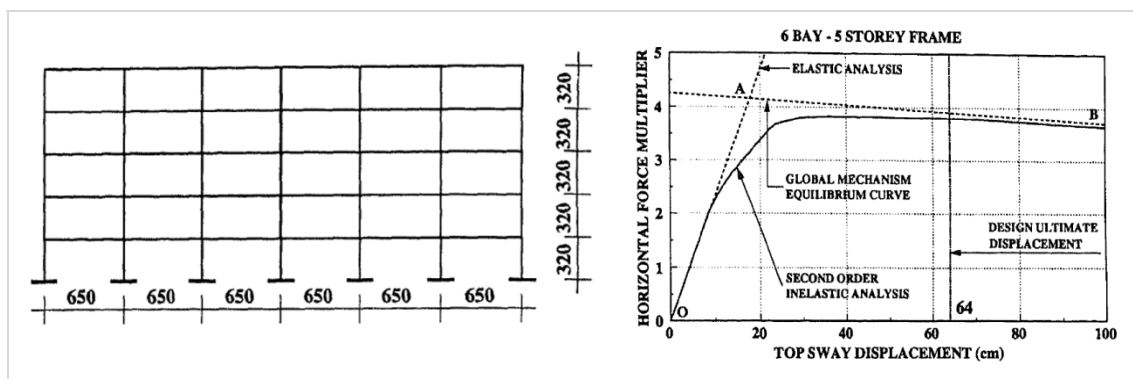


Figura 6 - Esempio di telaio in acciaio e relativa curva di push-over (da F.M. Mazzolani e V. Piluso).

6. Approccio dinamico non lineare

Qualora le assunzioni alla base degli approcci sopra descritti non possano essere giustificate, l'analisi più generale consentita risulta essere quella dinamica non lineare. Alcune considerazioni utili al suo svolgimento vengono di seguito riportate:

- **Riduzione del modello di calcolo.** Per una soluzione nel transitorio non lineare vengono eseguiti un numero di calcoli lineari pari al numero dei passi temporali scelti, moltiplicati per le iterazioni non lineari a convergenza. In relazione al normale numero di lanci per testare la correttezza del modello ed al numero delle iterazioni progettuali normalmente necessario, risulta evidente che il numero di gradi di libertà deve essere ridotto al minimo.
- **Utilizzo delle condizioni iniziali.** Occorre evitare che l'applicazione impulsiva dei carichi gravitazionali generi una oscillazione non voluta verticale del modello che possa sovrapporsi a quella orizzontale prodotta dal sisma.
- **Scelta del passo di integrazione nel tempo.** Il passo temporale riveste un'importanza di primo piano in quanto agisce da filtro per le accelerazioni sismiche in ingresso. Esso deve inoltre permettere una rappresentazione adeguata delle oscillazioni della struttura, pena la mancata convergenza dei passi temporali. Infine, una rappresentazione adeguata delle quantità risultanti (sollecitazioni interne, tensioni, ecc.) può giustificare la variazione del passo temporale di analisi.
- **Scelta del tipo di smorzamento.** L'assegnazione di rapporti di smorzamento su base modale non è più percorribile in dinamica non lineare. Le scelte possibili includono l'assegnazione di uno smorzamento viscoso (di non sempre facile attribuzione) o di Rayleigh. Quest'ultimo viene descritto da una legge a due parametri e di esso si può dare

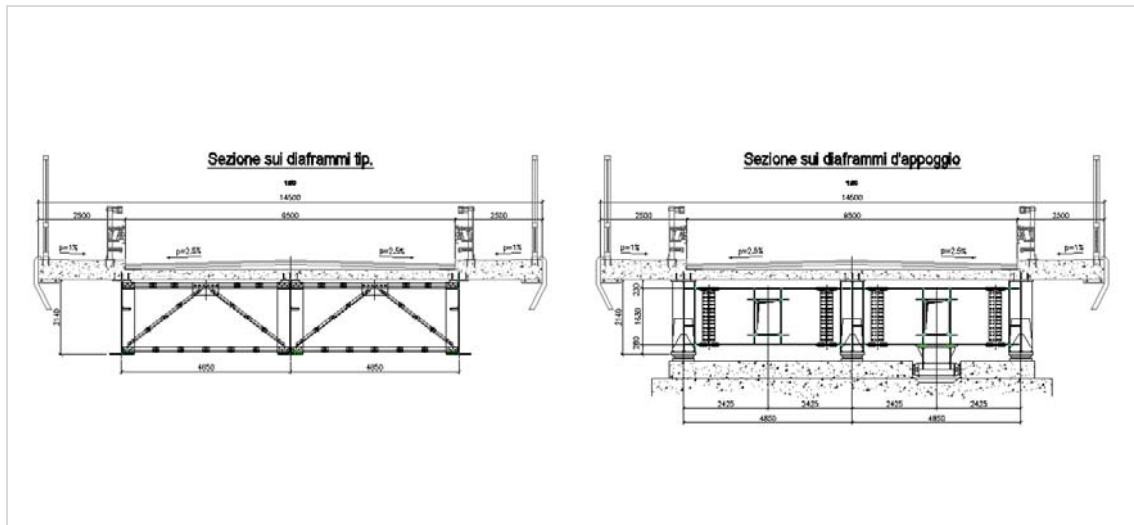


Figura 8 – Sezione trasversale dell’impalcato in corrispondenza di un tipico traverso reticolare e di un traverso in corrispondenza delle spalle o di una pila intermedia.

Le analisi condotte hanno riguardato:

- Analisi preliminari con struttura fissa per la determinazione del contenuto in frequenza.
- Analisi di confronto dinamiche lineari con isolatori elastici. Tali analisi, nelle quali agli isolatori vengono attribuiti comportamenti semplificati, offrono utili spunti di comparazione per le analisi non lineari da condurre.
- Verifica di correttezza dei solutori relativamente alle condizioni iniziali introdotte e alla massa inclusa nelle simulazioni.
- Analisi di sensitività allo smorzamento introdotto. In presenza di un ritegno sismico longitudinale non ricentrante si è voluto verificare che lo smorzamento considerato non potesse alterare i valori di spostamento residuo.

7. Procedure numeriche avanzate e di attualità

7.1 API e problematiche generali (esempio: “flutter” di ponti sospesi)

L’evoluzione continua della normativa e l’inserimento di sempre maggiori requisiti di analisi complesse, crea un problema di aggiornamento continuo degli strumenti informatici. L’utilizzo di **librerie personalizzabili** e di interfacciamento diretto con i codici di calcolo fornisce una interessante (anche se non molto diffusa) soluzione a tale problema.

Nell’ambito dell’analisi di ponti di grande luce soggetti alle azioni del vento, la determinazione della velocità critica di flutter riveste una importanza strategica. Per alcuni versi lo studio del flutter si può inquadrare come una sorta di analisi con distribuzione adattativa di forze. Le forze applicate dipendono infatti dagli spostamenti dell’impalcato e dai valori di angolo di attacco rispetto alla direzione del flusso incidente di aria.

7.2 Analisi al fuoco

L’analisi prestazionale delle strutture in condizioni di incendio è un altro ambito dove la simulazione numerica non lineare sta trovando sempre maggiori applicazioni.