

ANGELO BIONDI

ANALISI

PUSHOVER



CALCOLO NON LINEARE PER LA VERIFICA DEGLI
EDIFICI ESISTENTI E OTTIMIZZAZIONE DEI NUOVI



Scheda sul sito >

Dario Flaccovio Editore

Angelo Biondi

Analisi pushover

VERIFICA DEGLI EDIFICI ESISTENTI
E OTTIMIZZAZIONE DEI NUOVI



Dario Flaccovio Editore

Angelo Biondi

ANALISI PUSHOVER

ISBN 9788857903156

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: luglio 2014

Biondi, Angelo Maria <1966->

Analisi pushover : verifica degli edifici esistenti e ottimizzazione dei nuovi / Angelo Maria Biondi. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0315-6

I. Edifici – Restauro.

720.922 CDD-22

SBN PAL0271542

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, luglio 2014

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Premessa

Introduzione

Pushover, questo sconosciuto (trattazione semiseria sull'analisi sismica statica non lineare)

1. L'analisi pushover: aspetti generali

1.1. Cosa è l'analisi pushover	pag. 37
1.2. A cosa serve l'analisi pushover	» 38
1.3. Come funziona l'analisi pushover	» 40
1.4. Risultati dell'analisi pushover	» 41

2. La plasticizzazione

2.1. Concetti basilari dell'analisi pushover.....	» 43
2.2. Comportamento elastico e comportamento plastico.....	» 43
2.2.1. Legame costitutivo del calcestruzzo	» 45
2.2.2. Legame costitutivo dell'acciaio	» 46
2.3. Comportamento plastico delle strutture.....	» 48
2.4. Duttilità e dissipazione di energia.....	» 50
2.5. Cerniere plastiche	» 58

3. Analisi sismica statica non lineare

3.1. Analisi sismica statica e dinamica, lineare e non lineare.....	» 63
3.1.1. Analisi sismica statica lineare.....	» 64
3.1.2. Analisi sismica dinamica lineare	» 65
3.2. Analisi sismica lineare e non lineare	» 66
3.2.1. Analisi sismica statica non lineare	» 69
3.2.2. Analisi sismica dinamica non lineare	» 71

4. Funzionamento dell'analisi pushover

4.1. Fondamenti dell'analisi pushover.....	» 73
4.2. Punto di controllo.....	» 77
4.3. Curva di capacità	» 79

4.4. Curva o spettro A.D.S.R.....	»	86
4.5. Indice di vulnerabilità.....	»	93
4.6. Stati limite di verifica.....	»	95
4.7. Numero collassi.....	»	96
4.8. Comportamento delle pareti in c.a.....	»	98
4.9. I nodi in c.a. nella pushover.....	»	100

5. Limiti di applicabilità

5.1. Limiti dell'analisi pushover.....	»	105
5.2. Massa eccitata.....	»	105
5.2.1. Analisi pushover con modi superiori.....	»	107
5.3. Periodo di vibrazione.....	»	109
5.4. Regolarità strutturale.....	»	111
5.5. Livello di conoscenza.....	»	112
5.6. Presenza di impalcati rigidi.....	»	114
5.7. Elenco dei limiti di applicabilità dell'analisi pushover.....	»	115

6. Alternative all'analisi pushover

6.1. Alternative alla pushover.....	»	117
6.2. Analisi pushover per edifici senza impalcati rigidi.....	»	117
6.3. Analisi dinamica non lineare.....	»	119
6.4. Analisi lineare.....	»	119
6.5. I.D.A. Incremental dynamic analysis.....	»	121
6.6. Analisi pushover adattiva.....	»	122

7. L'analisi pushover per gli edifici in muratura

7.1. La pushover per la muratura.....	»	127
7.2. Il modello ad aste.....	»	127
7.2.1. Il metodo SAM.....	»	129
7.3. Livello di conoscenza del materiale.....	»	136
7.4. Parametri necessari allo svolgimento dell'analisi.....	»	139
7.5. Numero massimo collassi per la muratura.....	»	140
7.6. Massa eccitata e periodo di vibrazione.....	»	145
7.7. Il fattore q^*	»	146
7.8. Riepilogo delle differenze di applicabilità della pushover per gli edifici in c.a. ed in muratura.....	»	149

8. Applicazione dell'analisi pushover sugli edifici nuovi

8.1. Edifici nuovi	» 151
8.2. Sopraelevazioni o aggiunte strutturali	» 151
8.3. Verifica del progetto di un fabbricato nuovo.....	» 154
8.4. Come non rispettare la gerarchia delle resistenze.....	» 161
8.5. Fabbricati nuovi in acciaio e muratura	» 164

9. Pushover in breve

9.1. Riepilogo.....	» 165
9.2. Verifica di edifici esistenti.....	» 165
9.3. Ottimizzazione di fabbricati nuovi	» 166

Bibliografia	» 167
--------------------	-------

Premessa

Tramite questa pubblicazione si desidera fornire al tecnico professionista che opera nel settore della progettazione strutturale e del recupero del patrimonio esistente utili indicazioni riguardo la scelta delle procedure e degli strumenti di lavoro più adatti allo scopo, nonché alcuni validi suggerimenti per la risoluzione dei comuni problemi che insorgono in questo campo; il tutto, ovviamente, sempre nel rispetto delle prescrizioni e indicazioni previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni contenute nel D.M. 14 gennaio 2008.

Come mia consuetudine, nella presente pubblicazione non si affrontano le problematiche in oggetto da un punto di vista prettamente matematico-formulistico, bensì si cerca di metterne in rilievo soprattutto l'aspetto pratico e descrivere le conseguenze concrete che scaturiscono dall'applicazione dei concetti introdotti e dalle metodologie proposte.

Il testo propone la presentazione del metodo di verifica strutturale tramite l'applicazione dell'analisi sismica statica non lineare, meglio conosciuta come *analisi pushover*, ed evidenzia i punti delle N.T.C. 2008 in cui si fa riferimento al suddetto metodo, descrivendo anche le notevoli potenzialità applicative dello stesso, fra cui l'utilizzo finalizzato allo studio di edifici nuovi. Non è obiettivo di questo volume approfondire i principi fondamentali della progettazione di nuovi fabbricati secondo le N.T.C. 2008 (cosa che è già stata fatta nel precedente volume *Le nuove N.T.C. 2008 – Guida Pratica. Come cambia la progettazione strutturale*, edito sempre da Dario Flaccovio Editore), dando per scontato che il lettore ne abbia già una buona padronanza.

Se di tanto in tanto, durante la lettura di questo testo, troverete qualche frase non proprio conforme al linguaggio tecnico comunemente adottato nelle pubblicazioni di questo genere, non abbiatevene a male: l'ho fatto solo per rendere più “digeribile” un argomento decisamente non elementare.

Angelo Biondi

Introduzione

Pushover, questo sconosciuto

(trattazione semiseria sull'analisi sismica statica non lineare)

Data la natura piuttosto complessa dell'argomento che viene affrontato nella presente pubblicazione, l'autore propone, come primo approccio al

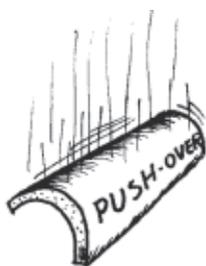


Figura 1. La tegola pushover

tema in questione, una trattazione “semiseria”, al fine di permettere al lettore di addentrarsi nel mondo dell'analisi pushover nella maniera più indolore, ma al tempo stesso efficace e diretta.

La seguente trattazione è stata stilata in collaborazione con l'ingegnere Umberto Biondi, fratello nonché collega dell'autore, mentre le figure, più o meno “esplicative”, sono ideate e realizzate dall'autore stesso.

Il primo impatto, ciò che evoca questo nome un po' misterioso e il fatto che non può assimilarsi a nulla di già conosciuto e masticato, tende a fare percepire questo famigerato “metodo pushover” come un'ulteriore tegola caduta sulla bersagliatissima testa di indifesi e ormai rassegnati ingegneri e architetti strutturisti, da qualche tempo in balia di decisioni, ripensamenti e capricci di quei mattacchioni dei legislatori italiani.

Se però si resiste al fastidio della novità, se non ci si spaventa per l'enne-

sima rivoluzione normativa (gli stati limite non sono ancora stati digeriti da buona parte degli addetti ai lavori) e non ci si lascia prendere dallo sconforto perché “tanto cambieranno di nuovo tutto un’altra volta”, allora si può scoprire che questa ultima novità contiene qualche buona notizia.



Figura 2. Assimilazione pushover

La prima buona notizia è che questo tipo di calcolo non è obbligatorio. Nessuno ci tira per i capelli se proprio non ne vogliamo sapere di capire di che cosa si tratta. Una buona notizia per i pigri, tutto sommato nulla di che. Tuttavia, per chi se la sente di fare un passettino avanti ci sono notizie più interessanti.

La seconda buona notizia è che, a parità di edificio, il calcolo secondo il metodo pushover risulta spesso meno oneroso in termini di verifica. Ciò significa che, se ho un edificio esistente, posso sperare di cavarmela senza interventi pesanti e costosi; se devo progettare un nuovo edificio posso ottenere dei risparmi considerevoli rispetto a un calcolo tradizionale (e per giunta non perdo nulla in termini di sicurezza). Insomma, non è una delle tante tegole che lasciano solo un bernoccolo in più, ma assomiglia più ad un aiuto aggiuntivo, messo lì per chi ne vuole approfittare.

La terza buona notizia è che a dispetto di una teoria apparentemente astrusa, figlia di concetti sottili e complicati, che costringe a spiegazioni zeppe di grafici e funzioni (ultimamente i corsi di aggiornamento sull’analisi

pushover si sprecano, lasciando però in giro molte facce perplesse e tanta preoccupazione), l'uso di questa metodologia di calcolo, da un punto di vista operativo, non è poi tanto difficile. Ci sono pochi dati aggiuntivi da inserire come input e pochi parametri da tenere sotto controllo ai fini della verifica. Quindi ci sono pochi numeri da fare quadrare, ma ci vuole una maggiore attenzione a concetti di massima e a dettagli costruttivi; l'impostazione generale della struttura diventa il passo più importante.

Insomma, lasciando da parte per il momento diagrammi, equazioni differenziali e magie (o stregonerie) simili, vale la pena di dare un'occhiata a questo raccontino per capire di cosa stiamo parlando. Il mostro è meno terribile di quanto può sembrare.

Pushover: cosa significa?

La normativa ci dice che dovendo effettuare un calcolo in zona sismica si può scegliere tra:

- analisi lineare statica
- analisi lineare dinamica
- analisi non lineare statica (detta appunto *pushover*)
- analisi non lineare dinamica.



Figura 3. Diversi tipi di analisi

Le prime due sono facce note, le conosciamo da tempo, non c'è molto da dire. In fondo neppure sull'ultima c'è da spendersi troppo in chiacchiere, visto che è una cosa abbastanza complicata, tanto che la norma non indica dettagliatamente cosa fare, ma permette solo a chi ne è in grado di utilizzarla, se sa dove mettere le mani, se se la sente... una cosa per studiosi, gente con programmi di calcolo costosi (e al momento complicati), per progettare un viadotto sul Grand Canyon o un grattacielo su Marte. Diciamo che per ora non ci interessa.

In sintesi: oltre al calcolo tradizionale ho la possibilità del calcolo pushover, quando voglio, per edifici esistenti, ma anche nuovi. Se penso che sia il caso, se penso in questo modo di ottimizzare la struttura e se sono in grado di fare un calcolo di questo tipo. Sarebbe quindi il caso di capirne di più.

Pushover: cos'è?

Il succo della faccenda, ciò che ispira chi ha inventato questo metodo, è semplicemente la voglia di capire cosa succede a un certo edificio quando è sottoposto a un sisma, in maniera più precisa di quanto si fa di solito. Il tutto semplificato in maniera notevole, ovviamente, ma deve rimanerci per le mani uno strumento utile a darci l'idea, abbastanza concreta, di come effettivamente la nostra casetta si comporti nella malaugurata ipotesi che la terra ci si metta a ballare sotto i piedi. Grosso modo, il principio ispiratore è questo: prendiamo l'edificio, mettiamoci di fianco un... gigante che comincia a spingere, e spingere, e spingere (*push* in inglese infatti significa spingere). E tanto spinge finché qualcosa si comincia a fessurare, poi a inclinarsi minacciosamente, infine tutto l'edificio si accartocchia e arriverci a tutti, va giù tutto come fosse stato fatto di cartone.

Mentre quella specie di Ercole spinge e spinge con tutta la sua forza e tutta la sua rabbia (anche se pare che, ai tempi, chi si occupasse dei terremoti era Nettuno, o Poseidone che dir si voglia, quello col forcone che ogni tanto spuntava dall'oceano), noi, da bravi ingegneri (perché di solito noi siamo bravi, ci mancherebbe), invece di allarmarci per lo scempio imminente, stiamo lì distaccati ad osservare cosa succede, passo dopo passo, alla nostra strutturina. Prima si comincia a fessurare in maniera vistosa l'estremo di una trave... ma ancora regge, nulla di grave. Bene. Poi succede la stessa cosa su un'altra trave, poi alla testa di un pilastro, poi qualcosa di simile da qualche altra parte della struttura. Ma ancora si regge in piedi. Magari abbastanza rovinata: cornicioni che volano giù, vetri delle finestre

in frantumi, calcinacci dappertutto, ma non è ancora cascata sulla testa di nessuno. Prima o poi, però, più o meno improvvisamente, si accartoccia e: crash! Poco ma sicuro. Il calcolo pushover si porta avanti fino alle estreme conseguenze.

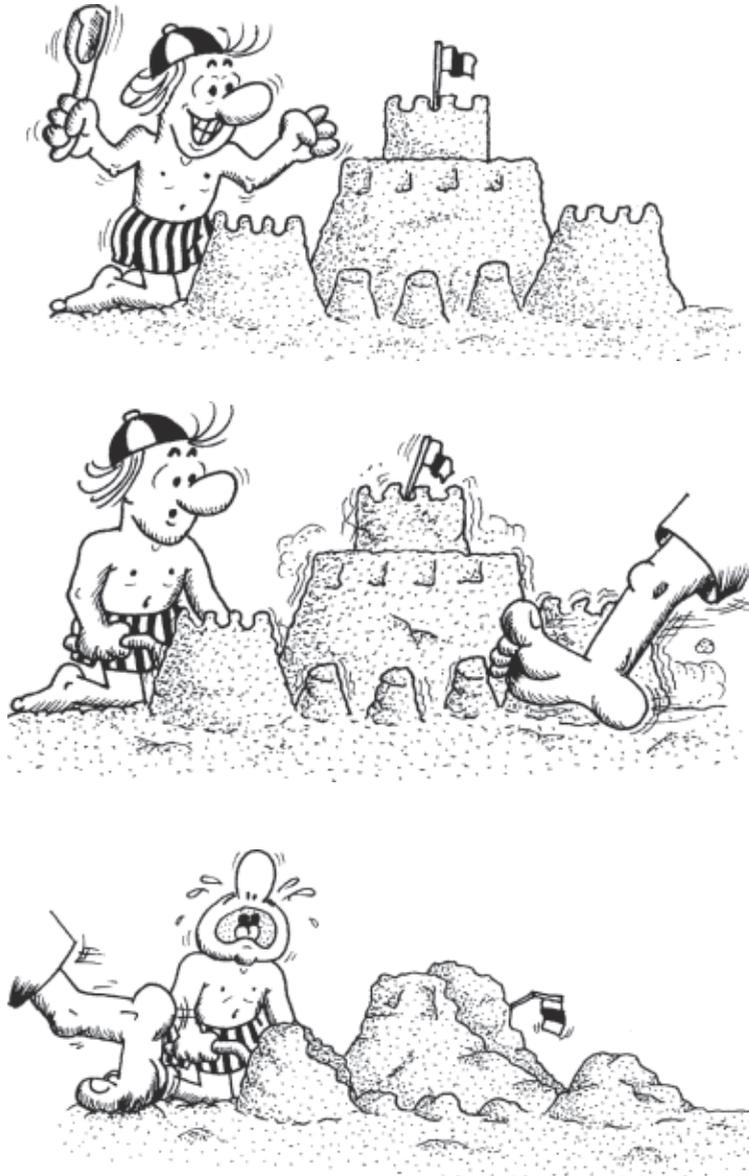


Figura 4. Effetto pushover

In un certo senso è qualcosa che assomiglia ai *crash test* delle automobili: si fanno sfasciare contro un muro per renderle più sicure. Solo che, nel caso degli edifici, la distruzione la facciamo solo per finta: è più conveniente (e si fa molta meno polvere).

Se questa è l'idea di base, possiamo già fare qualche congettura su quali siano le linee da seguire. Per esempio, se facessimo una struttura con travi e pilastri di... cristallo, non andrebbe di certo bene. Andrebbe tutto in mille pezzi, di botto. Potrebbe essere sicuramente resistente ma fragile, e proprio per questo motivo il cristallo non è un buon materiale da costruzione (e poi, con i solai tutti trasparenti sarebbe seccante essere continuamente guardati dal condomino del piano di sotto, quel rompiscatole). Il cemento armato già pare più indicato.



Figura 5. Uso del cristallo

Prima si fessura, poi le barre di acciaio si allungano, si snervano, e prima di rompersi del tutto si è deformato parecchio e abbiamo “consumato” un

bel po' di sisma. In termini più ingegneristici potremmo dire che il cemento armato è un materiale duttile e che la cosa è utile a “dissipare energia sismica”.

Il risultato è che se arriva un terremoto di quelli che poi se ne parla per un bel po' sui giornali, la nostra casetta ha molte più possibilità di rimanere in piedi. Tornando al cristallo, questo non va bene neppure se lo usiamo per un solo elemento (un bel pilastro in cristallo in pieno salone farebbe la felicità di più di un architetto). Perché quel nostro grazioso pilastrino di Boemia sarebbe il primo a saltare (riempiendo peraltro di schegge tutto l'appartamento) e si porterebbe appresso tutto il resto del palazzo in poco tempo, una specie di reazione a catena facilmente immaginabile, un specie di “muoia Sansone con tutti i filistei”: partita una colonna del tempio poi la seguono a turno tutte le altre, l'abbiamo visto in un sacco di film d'epoca.

Applicazione pratica dell'analisi pushover

Ma non perdiamo ulteriormente tempo in ciance e divagazioni classicheggianti. Dato che ormai senza un bel software non riesco più neppure a fare le divisioni con la virgola, ho già tra le mani il mio bel programmino, appena aggiornato, nuovo fiammante senza ancora neppure un graffio sulla confezione. La struttura l'ho *inputata* e voglio semplicemente sapere cosa fare, che dati inserire, quale comando schiacciare, come capire se questa benedetta verifica pushover posso dire che sia soddisfatta, se devo correggere e modificare qualche piccolo dettaglio o se ho fatto tante di quelle stupidaggini che è meglio impostarla tutta in un altro modo.

Sicuramente ci saranno dei dati generali relativi all'impostazione del calcolo pushover, che sono pre-impostati, e di regola si possono pure lasciare stare così come sono. Ma attenzione, questa non è in generale una buona politica. Anzi.

Trascurare qualche elemento solo perché non si sa di cosa si sta parlando è una faccenda un po' stupida e perfino pericolosa se stiamo calcolando qualcosa che riguarda la sicurezza di persone. Quindi cerchiamo di vedere di che si tratta, dato per dato. La fiducia nel programma va bene, gli sviluppatori sono bravissimi, ma i dati di default non sono oro colato, e comunque quelli che vano bene per una struttura possono essere inadatti per un'altra. Vediamo quali sono i più importanti parametri da impostare quando si svolge un'analisi pushover tramite software.

Spostamento massimo

Può darsi che il calcolo prosegua anche per spostamenti molto alti, fuori anche dalla logica. Ciò può succedere raramente, nel caso di situazioni molto particolari. Per evitare questi casi è bene limitare lo spostamento massimo (si tratta dello spostamento orizzontale del baricentro dell'ultimo piano, quello che si definisce *punto di controllo*).

Concentrazione eventi

Gli "eventi" sono "modifiche funzionali localizzate", più o meno gravi: ad esempio, quando a un estremo di una trave si crea la cerniera plastica oppure si ha una rottura in qualche elemento.

Ad ogni evento, il programma deve procedere ad un calcolo completo della struttura (cioè un bel lavoraccio). D'accordo che quel lavoro non lo fate voi, ma quella stupida macchina del computer (l'ingegnere di regola è animato da una sana pigrizia). Visto che, in ogni caso, un po' di tempo per ogni soluzione se lo porta via, e visto che le soluzioni sono sicuramente qualche decina e possono diventare anche centinaia, può essere il caso di evitare inutili sprechi. Questo dato serve a comunicare alla stupida macchina che, quando due o più rotture sono quasi simultanee, non è il caso che vada tanto a cercare il pelo nell'uovo, perché entro un certo limite sta bene che vengano considerate simultanee (l'ingegnere è anche uno spirito pratico).



Figura 6. L'ingegnere e il computer

Un valore adeguato potrebbe essere 0,01, che sta a significare che si considerano simultanei due eventi se si verificano entro un intervallo per cui la forza tagliante complessiva varia di meno dell'1%. Aumentando tale valore si aumenta l'intervallo in cui gli eventi compresi si possono considerare simultanei, e di conseguenza la velocità a scapito della precisione. Se invece vogliamo cercare il pelo nell'uovo (e vogliamo perdere tempo perché non sappiamo che altro fare per passare il pomeriggio) allora dobbiamo mettere 0.

Iterazioni max passo

L'iterazione max passo serve in un certo senso a limitare il calcolo dopo un certo numero di tentativi, sempre nell'ottica di non stare lì a perdere un sacco di tempo per cose un po' inutili. Infatti, tale dato si riferisce alle situazioni in cui la prima rottura c'è già stata e il programma deve ripercorrere tutta la curva già fatta, ma senza l'elemento rotto. Se la struttura è in cemento armato, secondo norma io mi dovrei semplicemente fermare lì: il di più è pura e semplice curiosità. Se si tratta di muratura, invece, può capitare di dovere andare avanti per un po' (mi devo fermare quando la resistenza dell'edificio è calata del 20% rispetto a quella massima, quindi un po' di muri sono già andati ma io non ho ancora finito).

Numero max collassi

Per la verifica di una struttura è utile andare oltre il primo collasso solo se questa è in muratura, come abbiamo già detto. Ma siccome a volte l'ingegnere è una creatura curiosa, può volere andare avanti e vedere cosa succede anche se l'edificio è in cemento armato, finché non rimane in piedi un solo pezzetto della struttura che aveva costruito con tanta pazienza e dedizione. Quanti collassi parziali voglio vedere? Basta indicarlo in questo dato e sarò esaudito.



Figura 7. L'ingegnere e i collassi parziali

Se non ho fantasie particolari, come detto, me ne basta uno per il cemento armato, ma può non bastare se sono tutti pietre e mattoni.

Effetti Pi-Delta

Vuoi tenere conto nella tua analisi non lineare di effetti geometrici non lineari del secondo ordine? Detta così sembra una domanda della sfinge, quella specie di leone di pietra con la testa di donna che si narra facesse delle domande incomprensibili, forse senza soluzione, a chiunque chiedesse di passare. La soluzione di questo quesito invece è abbastanza semplice: se la mia struttura è abbastanza alta e flessibile mi conviene dire “Sì”, per non perdere in precisione (anche perché la perdita di precisione in questo caso è tutta a scapito della sicurezza, quindi meglio non rischiare); negli altri casi sarebbe solo una perdita di tempo senza utilità: per strutture non molto snelle in cemento armato o muratura è senz’altro il caso di dire di “No”. Oppure, nel dubbio, si può fare la prova con tutte e due le possibilità per vedere cosa cambia. E la sfinge non avrà nulla a che ridire.

Nodi in calcestruzzo

Naturalmente tutti voi sapete benissimo che non si rompe solo la trave o il pilastro, ma si può rompere anche il nodo (parliamo di cemento armato), quella specie di cubetto che si viene a formare dove si incrociano travi e pilastro. Lo sapevate, vero? Non avevo dubbi. Ma la rottura di questo nodo si può avere a vari livelli di resistenza; sempre fragile, d’accordo, ma la resistenza cambia a seconda che questo nodo sia staffato (che è meglio) oppure no. Naturalmente, la rottura si può avere solo se una faccia del nodo è libera; nel caso di quattro travi ortogonali che convergono sul pilastro, il nodo è tutto confinato (si dice così) e il problema non esiste. Con questo dato posso comunicare al programma se, secondo me, il nodo è sempre staffato o non lo è mai.

Oppure, fare in modo addirittura che non tenga conto in nessun caso della rottura del nodo non confinato. In quest’ultima eventualità sarebbe meglio avere dei buoni motivi per giustificare la scelta, per ritenere che, per la mia struttura, questo non sia un grosso problema (ad esempio, che mi impegno formalmente e davanti a testimoni a prendere provvedimenti seri affinché i nodi non si rompano mai). O, magari, voglio solo fare una prova senza e vedere cosa cambia. In ogni caso, farlo solo perché l’edificio verifica meglio non è una buona politica. Mai scegliere un dato al posto di un altro

perché facendo così il risultato migliora: sarebbe come se un pilota di aereo schiacciasse un certo pulsante che non sa a cosa serve solo perché in questo modo si consuma meno carburante e quel certo rumore fastidioso non si sente più... potrebbe avere semplicemente spento i motori.

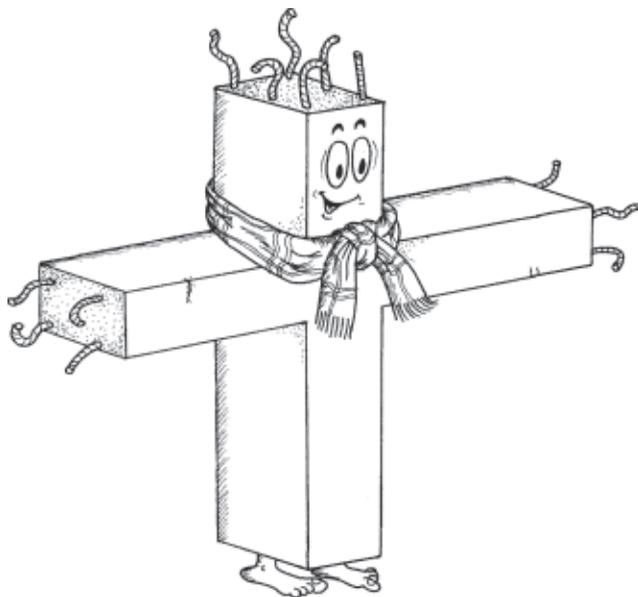


Figura 8. Il nodo

Nodi in acciaio

Certo, poi ci sono anche i nodi delle strutture in acciaio. Quegli affari a base di bulloni, flange, fazzoletti, ginocchi, saldature, tutta questa marea di cose complicate dalla forma strana. Anche questi nodi si rompono, anche se ognuno si sfascia a modo suo, con le sue formule particolari e tutta la sua originalità: in alcuni si svergolano le flange, in altri schizzano via i bulloni, oppure i fazzoletti si strappano come fossero di cartone. A noi adesso basta sapere che la resistenza a rottura di ogni nodo, quella cosa complicata da mal di testa, può essere amplificata per un certo coefficiente quando facciamo un calcolo pushover. Nel senso che la resistenza del nodo è (dovrebbe essere) superiore a quella dell'asta di una certa percentuale. Nei casi di strutture nuove il legislatore, quella pasta d'uomo, è gentile e ci semplifica la vita dicendo che questo coefficiente vale 1,20 per l'acciaio di tipo Fe360, 1,15 per il tipo Fe430 e 1,10 per il Fe510. Noi ringraziamo e

siamo a posto così. Non vogliamo sapere altro. Se la struttura invece esiste già, magari è il caso di dare una controllatina, di accertarsi che questi nodi siano fatti proprio bene o magari no, e allora questo coefficiente può anche essere 1, o anche meno di 1, che significa che il nodo è più debole dell'asta che collega e che perciò si rompe prima lui.



Figura 9. Una verifica

Calcolo

Fine dei dati generali. E direi che finora non è che abbiamo fatto sforzi sovrumani. Visto quindi che la stanchezza non ha ancora preso il sopravvento annebbiandoci il cervello, vediamo di andare avanti. L'input è fatto, è sempre quello. Dovremmo solo lanciare il calcolo, non ci manca altro... Parrebbe di no. Andiamo nella fase di calcolo e vediamo un po'. Allora, a parte i calcoli "normali", quelli che conosciamo (statica, dinamica, la solita solfa insomma), cerchiamo le voci nuove: "Scelta Pushover". Se il sof-

tware che sto usando non l'ho scaricato abusivamente da un sito Internet che propone suonerie per cellulari con gli ultimi successi dello Zecchino d'oro, screen saver con i puffi e software per la pushover, dovrei trovare tre diverse possibilità.

Verifica di un edificio esistente

Dobbiamo selezionare la voce “Verifica di un edificio esistente” se l'edificio già esiste, e questo si capiva anche senza essere dei bravissimi ingegneri quali siamo. Se parliamo di acciaio o di muratura, tutto liscio: lanciamo il calcolo e via, a vedere i risultati. Ma per il cemento armato una domanda sorge spontanea. O per lo meno dovrebbe sorgere agli ingegneri attenti. E se non è sorta, per distrazione, comunque la facciamo adesso: se l'edificio è esistente è chiaro che, assieme alla geometria e ai carichi, devo pure riferire al programma che armature sono presenti dentro tutte le travi e tutti i pilastri: dove sono queste armature che il calcolo deve prendere in considerazione? Non vale che il programma al solito mi tiri fuori esecutivi, staffe, tondini, sagomati e via cantando.

Non me ne farei nulla. I progettisti originari, quei simpatici tipi di trenta o quarant'anni fa, hanno fatto sicuramente di testa loro, e in fondo non sappiamo chi erano e neppure cosa gli frullasse in testa all'epoca. Quasi sicuramente, poi, non avevano un programmino che facesse i disegni per loro, quei poveretti. Quindi mi armo di pazienza, prendo tutti quei bellissimi esecutivi d'epoca sepiati e infilo tondini e staffe un po' dappertutto. Non ho scelta. Ma non finisce qui. Oltre all'input delle armature esistenti, devo anche specificare se le barre sono ancorate, se le

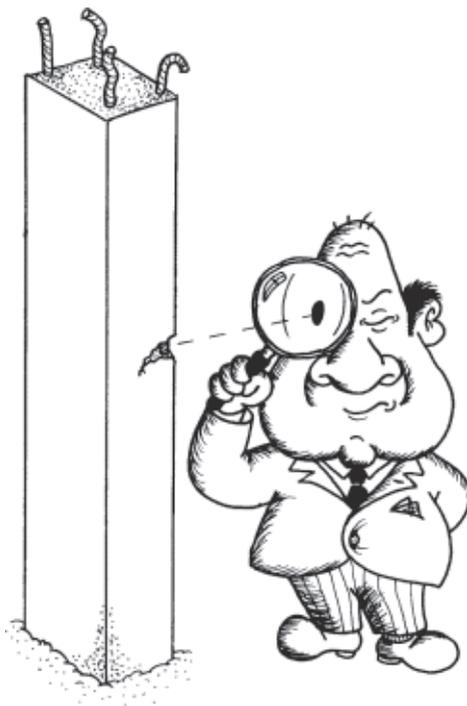


Figura 10. Verifica di un edificio esistente

staffe sono chiuse e tante altre belle cose, tutte molto simpatiche. Certo, può essere anche un lavoraccio, una bella seccatura, ma continuiamo a non avere scelta. Brutta bestia la pushover, comincia a starmi un po' antipatica.

Aggiunta e/o adeguamento

Cos'è un edificio esistente l'abbiamo capito, non è il caso di insistere. Un'altra possibilità parla di un edificio nuovo (e anche questo sappiamo cos'è, mica ci siamo laureati per niente) a cui dobbiamo aggiungere un pezzetto, oppure l'adeguamento di uno esistente, cioè con modifiche significative. In questo caso definisco in input solo le armature degli elementi esistenti e non delle parti nuove o da modificare. Il programmino che utilizzo, questo servizievole simpaticone, provvederà al progetto di queste ultime, secondo tutte le norme del caso.

Con questo tipo di scelta il programma eseguirà prima un pre-calcolo, proprio per scegliere queste armature che io non ho assegnato, permettermi di guardarle, manipolarle (perché agli ingegneri piace sempre manipolare un po'), e, quando mi stanno bene, confermo che può andare avanti con la pushover, come se l'edificio fosse tutto esistente.

Progetto simulato

L'ultima possibilità è una benedizione per i più pigri, o comunque per tutti quei casi in cui i disegni originali degli esecutivi siano introvabili, andati persi in un'alluvione nel '68, mangiati dai topi nelle cantine del Genio Civile (ipotesi purtroppo molto più realistica di quanto questa trattazione semi-seria lascerebbe immaginare), non siano mai esistiti o li aveva portati via con sé l'ingegnere progettista che trent'anni fa decise di emigrare in Australia senza lasciare l'indirizzo al vicino di casa (a volte gli ingegneri hanno il vizio di partire per l'Australia senza lasciare l'indirizzo ai vicini). In uno di questi frequentissimi casi può essere una buona idea quella di ipotizzare che quell'ingegnere, ormai naturalizzato australiano, a suo tempo avesse fatto quanto meno un calcolo alle tensioni ammissibili, pur senza tenere conto di nessun sisma o futuri limiti di normativa. Quindi noi chiediamo gentilmente al sempre disponibile software di immaginare questo calcolo, senza sisma e con le tensioni ammissibili. A questo punto, anche se la già menzionata pigrizia dell'ingegnere ci suggerirebbe di fidarci ciecamente delle armature che verranno fuori dal progetto simulato, imponiamoci di dare un'occhiata furtiva a questi ferri, cercando magari

di fare qualche piccola manipolazione, nel caso in cui i ferri che abbiamo sbirciato in cantiere sulla struttura reale non fossero proprio coincidenti, e poi avanti con pushover fino alla fine.



Figura 11. Ritrovamento del progetto

E i setti?

Abbiamo dimenticato una cosa, sicuramente ve ne siete accorti: e i setti? Non andiamo a dare un'occhiata alle armature dei setti? Non le inseriamo? Non le manipoliamo? No, non lo facciamo. Di proposito. Per il calcolo di tipo pushover i setti, come anche le piastre, non si rompono mai, hanno cioè che si definisce un comportamento indefinitamente elastico. Non si rompono mai setti e piastre? Davvero? Naturalmente no, neppure per idea, ci mancherebbe altro. Solo che non è che si sappia bene in che modo possano rompersi; né il legislatore, quella vecchia lenza, ci dà alcuna dritta in proposito. Ci dice che su travi e pilastri si formano le famose cerniere plastiche, ma sui setti nessuna indicazione. E allora? Boh! Di sicuro sappiamo che un setto è abbastanza più resistente di un pilastro: si dovrebbe rompere prima il pilastro. Ma ne siamo sicuri veramente? No. Quindi se abbiamo dei setti nella nostra struttura da pushover: prudenza! Se sono muri grossi e

lunghi, ad esempio setti di cantinato, tutto sommato non dovremmo avere grosse preoccupazioni. Anche delle piastre, in fondo, potremmo preoccuparci poco: per loro natura non si occupano di resistere alle forze sismiche ma solo a quelle verticali, e comunque non risentono granché delle forze orizzontali. Ma se si tratta di setti alti e snelli, beh, allora potrebbe essere il caso di farli diventare un sistema equivalente di travi e pilastri, tanto per stare più sul sicuro.

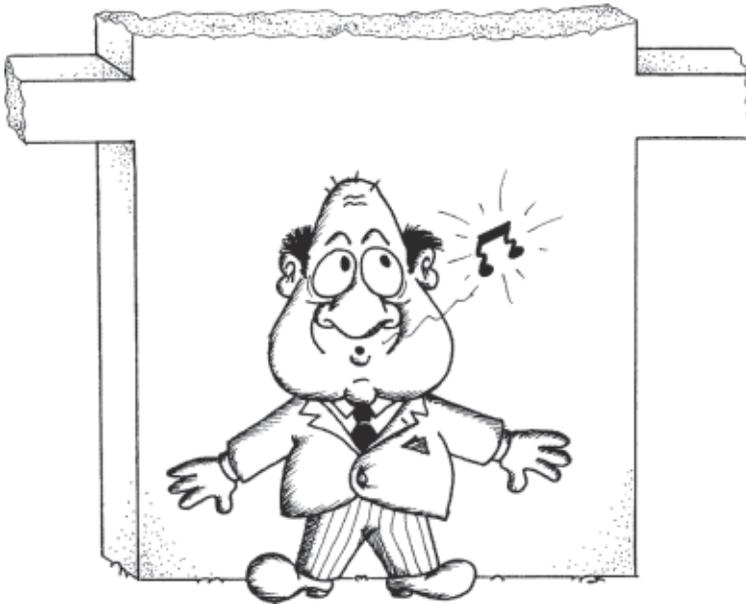


Figura 12. Un'altra verifica

Avvia Pushover

Siamo pronti, è tutto a posto e la pushover è pronta per partire, ce l'abbiamo in pugno. Solo che a questo punto possono apparire (speriamo di no) nuove inattese caselle che ci propongono delle nuove scelte, peraltro abbastanza misteriose. Di che diavolo si tratta? Vediamo un po', con calma e senza lasciarci prendere dal panico. La prima voce recita: "Verifica per combinazioni statiche". È seguita, come tutte le altre, da un quadratino dove posso mettere una spunta, oppure no (ci vado sopra col cursore del mouse e faccio click). Se la metto, chiedo al programma di eseguire le verifiche di tutti gli elementi con le armature già approvate, per i carichi statici, perché se una struttura mi va in crisi per i soli pesi, senza che di

terremoto se ne sia ancora sentito parlare, non è che il nostro progetto vada proprio benone. Se è una struttura esistente che non mi fa troppo affidamento direi, quindi, che è il caso di controllare.



Figura 13. Un disastro

Se invece l'ho appena progettata e non penso di avere fatto stupidaggini clamorose, allora per il momento posso anche farne a meno. Poi seguono altre otto caselle, che si riferiscono ad altrettanti calcoli di tipo pushover. Le posso spuntare tutte, o solo qualcuna, ma devo tenere presente che ogni singolo calcolo già di suo comprende qualche decina o forse un centinaio di calcoli tradizionali: quindi non è il caso di esagerare facendo i generosi e attivandole tutte e otto. Per i primi tentativi è il caso di andarci più leggeri, lanciarne una per volta per cominciare a vedere che succede, per farsi un'idea.

Tanto ci dobbiamo tornare tante volte: non illudiamoci di cavarcela al primo tentativo.

Modo e massa

Allora, le prime quattro *push* (vista la confidenza ci permettiamo di chiamarla semplicemente e affettuosamente “push”) si riferiscono a sisma in direzione X , poi sisma in direzione $-X$ (verso contrario), direzione Y e direzione $-Y$. Fin qui tutto chiaro: per ogni direzione del sisma il calcolo va rifatto, lo sappiamo bene. Sappiamo perfino che se la struttura è simmetrica può bastare, ad esempio, il sisma X perché quello $-X$ dia sicuramente risultati simmetrici, o lo stesso con Y . Ma poi perché mi vengono proposti altri quattro calcoli apparentemente simili? Che differenza c'è? L'intesta-

zione è diversa: la prima quaterna potrebbe intitolarsi “proporzionale al modo”, che potrebbe proprio significare “forze sismiche proporzionali al principale modo di vibrare della struttura nella direzione indicata” (evviva la sintesi). Le forze sismiche sono sempre proporzionali alle masse, non ci piove. Ma sappiamo anche che più si sale e più queste forze crescono: il famoso coefficiente Gamma-i (o qualcosa del genere), una vecchia conoscenza. Insomma, una distribuzione di forze triangolare (per semplificare), che assomiglia tanto ai calcoli che facciamo sempre.

Poi invece ci sono le altre quattro *push* con un titolo del tipo “proporzionale alla massa”. Forze proporzionali alle masse, e basta, senza Gamma-i, diagramma rettangolare, per rendere l’idea. Perché tutto questo? Perché lo dice la norma, si devono fare tutte e due. Punto. (Tanto per avere un’idea: le prime quattro cercano di assomigliare al comportamento della struttura ancora intatta, le altre quattro a quella che sta per andare al tappeto per piano “soffice” al primo livello). Per cominciare a fare delle prove magari ne lancio solo una, in un secondo tempo proverò pure l’altra, tanto prima o poi le dovrò verificare tutte. Poi, solo alla fine, quando sarò sicuro del fatto mio (perché so che verificano tutte), le lancerò tutte e otto e andrò a fare una bella passeggiata. Ma per adesso lavoriamo.

Eccentricità accidentale

Non è ancora finita, c’è un’ultima seccatura. È apparsa un’ultima casella che serve a spuntare l’attivazione dell’eccentricità accidentale imposta. Anche questa è obbligatoria: quindi, prima o poi la dovrò attivare. Ma siccome l’eccentricità può essere nelle due direzioni, questo raddoppia il numero di elaborazioni. Perciò, al solito, se sono ancora nella fase esplorativa, quando ancora cerco di capirci qualcosa, me la posso risparmiare: se la struttura è abbastanza regolare non mi dovrebbe incidere in maniera clamorosa sui risultati. Ma alla fine, poco prima della mia meritata passeggiata (e io sono dell’idea che gli ingegneri debbano passeggiare un po’ di più), dovrò spuntare pure quest’ultima casella.

Visualizza diagrammi

Finalmente siamo pronti per avviare le nostre amate *push*. La prima si è prodotta in un bellissimo grafico a video pieno di pallini colorati che spuntano a raffica, quasi una specie di fuoco d’artificio, e adesso ha già terminato di girare. Non siete ansiosi di vedere cosa è venuto fuori?

Dopo ogni calcolo, *push* o non *push*, un'occhiata alla deformata della struttura ci vuole, giusto per capire se abbiamo fatto errori catastrofici, tipo un tetto che non poggia sui pilastri, travi di dieci metri che lavorano a mensola o pilastri penzolanti in aria. Fatto questo, dopo esserci assicurati del fatto che la deformata statica della struttura non sembra l'opera di un ubriaco o l'ultima opera di uno scultore molto moderno, andiamo a concentrarci sul risultato della nostra tanto attesa verifica pushover. Già a video appare un grafico. Questo grafico ci indica il comportamento della struttura sotto l'azione di un certo sisma, crescente fino al collasso. Allora, che succede? Come si è comportata la casetta? Il colpo d'occhio generale già ci dice tante cose. Se la struttura è di tipo fragile, o anche solo parzialmente fragile (il pilastro di cristallo nel salone), allora la curva sarà una retta inclinata o qualcosa che ci assomiglia abbastanza. Questa sarebbe una bruttissima notizia, roba da drizzare i capelli sulla testa, per chi ce li ha (spesso gli ingegneri non appartengono a questa categoria).

Nei casi un po' migliori, invece, la linea si mantiene retta e inclinata per un po', poi comincia a curvare per raccordarsi gradualmente con un tratto quasi orizzontale. Nei casi bellissimi, infine, questo tratto quasi orizzontale è molto, molto lungo. Quest'ultima forma vuole suggerirci che la nostra struttura si è cominciata a sfasciare un po' dappertutto ma di cadere giù proprio non ne vuole sapere: il nostro colosso ha dovuto sudare parecchio per buttarla giù con la forza delle sue braccia, per quanto gigantesche.

Verifica o non verifica? Questo è il dilemma

Sì, pare che tutto vada a meraviglia. Ma cosa racconto a quelli del Genio Civile? Che la curva è bella, piatta e lunga? No, cerchiamo di capirci di più. Il diagramma, come tutti i diagrammi che si rispettino, ha una unità di misura per le ascisse e una per le ordinate.

Le prime indicano lo spostamento; in questo caso, di quanto si sposta il baricentro dell'ultimo piano dell'edificio. L'asse delle ordinate, invece, misura la forza complessiva che Ercolino deve impiegare per arrivare a quel determinato spostamento. Più cresce la forza, più aumenta lo spostamento. Una curva più piatta, quindi, significa che verso la fine il nostro palazzo si muove quasi senza aumentare questa forza: è diventato cioè una specie di mozzarella, ma nonostante tutto continua imperterrito a rimanere in piedi. Ma ancora sono chiacchiere: verifica o non verifica? Allora, guardiamoci un po' attorno. Da qualche parte dovrebbe esserci una finestrella dove sta

scritto “Capacità”. Significa che quella che stiamo guardando con tanta soddisfazione si chiama “Curva di capacità”. Il che ci riempie di gioia, ma sinceramente non abbiamo ancora capito cosa farci. Andiamo sulla finestrella e vediamo un po’, magari troviamo un’altra opzione che si chiama “Spettro A.D.S.R.”. Misteriosa e un po’ inquietante: che roba è? Ma noi impavidi la selezioniamo: e il miracolo si avvera!

Spettro A.D.S.R.

Una notizia fantastica: a parte il solito diagramma, è finalmente comparsa una bellissima tabella con su scritte una serie di cose, tra cui “Non verificato”, nel caso qualcosa non vada bene, oppure nulla negli altri casi, che noi già intuivamo siano quelli in cui tutto va a meraviglia. Pare che siamo arrivati al quid, al nocciolo, al punto che sintetizza e finalmente emette verdetti. Guardando con meno apprensione il riquadro possiamo capire che vengono effettuate tre verifiche distinte: “Danno lieve”, “Danno grave” e “Collasso”.

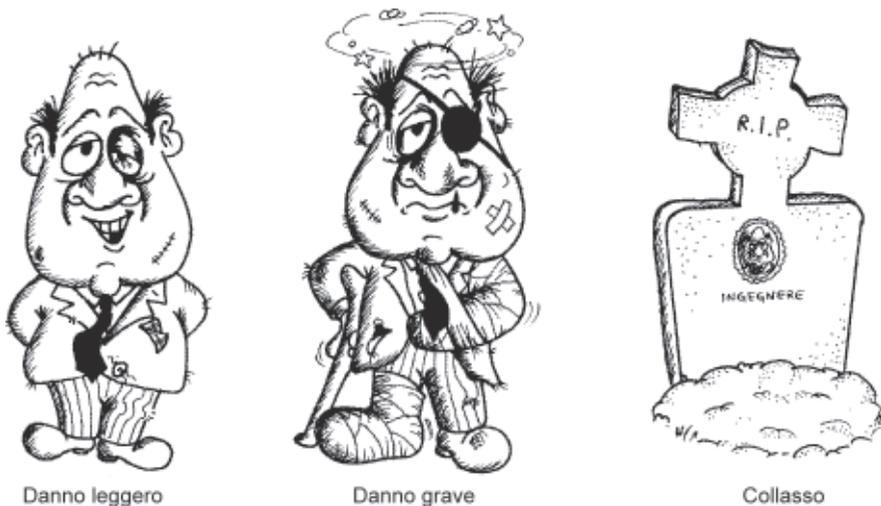


Figura 14. Tipologie di danni

Tre sole verifiche per dire se tutto un edificio funziona o non funziona è una bella operazione di sintesi, non c’è che dire. Anzi, se stiamo parlando di acciaio o muratura sono perfino due, non si esegue il controllo del collasso. Bene, molto bene. Per ogni tipo di verifica mi viene proposta una

“Domanda di spostamento” e una “Capacità di spostamento”, quello che dovremmo avere e quello che abbiamo. Ciò che deve accadere per potere affermare che le cose stanno a posto è che il secondo spostamento sia maggiore del primo, che la capacità sia superiore alla domanda, che la cifra che ho nel portafogli sia superiore o almeno uguale al prezzo di ciò che voglio comprare. Se le cose stanno così il verdetto è favorevole; in caso contrario pollice verso, signori della corte. E in questo caso? Che si fa?

Come si corregge la rotta

L'eventualità che al primo calcolo la verifica non risulti soddisfatta non rappresenta in fondo una grossa tragedia. Un bravo ingegnere (del resto siamo quasi tutti bravi, alcuni addirittura bravissimi) sa cosa fare, cosa modificare, se può essere utile spostare un pilastro, modificare una sezione, aumentare un'armatura o magari diminuirla. E comunque non bisogna azzeccare tutto al primo tentativo, si prova e poi si controllano i risultati: se questi vanno meglio allora la strada era buona; altrimenti se ne sceglie un'altra. Ma l'inghippo sta nel fatto che mentre con i calcoli vecchio tipo spesso era sufficiente aumentare le dimensioni dell'elemento che non verificava (metodo rozzo ma spesso efficace), con pushover non è che funzioni proprio così, anzi: a volte quello che ci risolve la situazione è una mossa che a prima vista può sembrare impensabile o addirittura quasi suicida (tipo fare le travi più piccole a parità di armatura e non toccare nient'altro). Cerchiamo di arrivarci poco alla volta. Dopo il calcolo vediamo di capire cosa è successo nella struttura, come si evolvono i vari danneggiamenti successivi, cosa è che va a collassare decretando la non verifica della struttura.

Evoluzione delle rotture

In tutti questi corsi di aggiornamento, materiale scientifico, pubblicazioni, libri e manuali emerge un concetto tutto sommato simpatico, che è quello della “Cerniera plastica”.

Praticamente, man mano che la forza sismica cresce si cominciano a creare tutte queste bellissime cerniere, un po' dappertutto, in forma di pallini colorati. E il vostro bel programmino poteva negarvi questa divertentissima rappresentazione? Naturalmente no. Ci sarà da qualche parte una visualizzazione dei risultati in cui è possibile vedere spuntare come mele su un albero tutte queste palline, passo per passo. Così, cominciamo a capirci qualche cosa: capiamo dove si formano le prime palline, dal colore ca-

priamo anche se si tratta di un problema poco serio, o un po' peggio, o la rottura di brutto.



Figura 15. Cerniera plastica

Noi, da bravi ingegneri, apprezziamo l'effetto estetico da albero di natale, ma in realtà capiamo anche un sacco di cose. Capiamo ad esempio se le cerniere si formano prima nelle travi o nei pilastri. E noi sappiamo benissimo, non abbiamo alcun dubbio in proposito, che è molto meglio se si cernierizzano prima le travi (sappiamo anche che "cernierizzano" è un termine che non si deve usare mai, ma a volte ci piace prenderci qualche libertà). In caso contrario sappiamo altrettanto bene che conviene fare pilastri un po' più grossi e travi un po' più piccole. Sì, però... non è sempre così semplice. E poi una cerniera che si forma deve anche potere durare un bel po', cioè permettere una certa rotazione prima di rompersi. Bisogna capire un altro po' di cose.

Rotture buone e rotture cattive

Sicuramente il vostro programmino vi dirà anche per quale motivo si è formata la pallina colorata sull'asta, cioè per quale motivo quell'asta si è plasticizzata o addirittura rotta. Vediamo le principali possibili modalità di plasticizzazione o rottura (più il vostro programmino è evoluto e più ne troverete):

- *elastica*: l'asta di questo tipo (di solito è bianca) è una di quelle che non ha avuto problemi, è ancora intatta e tranquilla, non si è neppure accorta che c'è stato un terremoto, beata lei. È abbastanza normale che questo succeda per le travi che sono in direzione ortogonale al sisma, che quindi con questo non hanno molto da spartire. Ma se succede per tante altre, pilastri compresi, allora non è un buon segno, significa che qualcosa si è rotto troppo presto;
- *flessione*: significa che l'asta è luogo di una o più cerniere flessionali, una delle cose migliori che ci si possono aspettare. Una rottura buona, buonissima;
- *taglio*: una rottura a taglio, mannaggia, dovevamo evitarla a tutti i costi;
- *deformazione assiale*: significa che un'asta va in crisi per superamento della deformazione assiale massima consentita. Quasi sempre si tratta di un tirante che proprio non ce la fa più. (Per l'acciaio questa deformazione limite non è l'1% che si usa per le verifiche S.L.U. ma il valore associato alla massima resistenza, cioè circa il 4%);
- *instabilità*: in un certo senso non si è ancora rotto niente, ma un'asta instabilizzata praticamente è come se non esistesse più, quindi l'effetto è dello stesso tipo. Naturalmente sappiamo benissimo come risolvere il problema di un'asta instabilizzata (vero?);
- *flessione fragile*: flessione sì, ma del tipo cattivo: fragile, cioè senza speranze. Questo meccanismo è associato alle travi di fondazione, perché il nostro affezionato legislatore (quella sagoma) ci fa presente che se si viene a creare una cerniera in una trave di fondazione, nel terreno sottostante possono succedere cose turche, poco prevedibili, spesso brusche e che possono fare andare a pallino tutto l'edificio che sta sopra. Quindi, della eventuale duttilità della trave non ce ne possiamo fare niente, meglio stare lontani quanto più possibile da problemi di questo tipo. Se succede perciò fate subito travi di fondazione più grosse (o rimpicciolite i pilastri se avevate esagerato);
- *taglio per scorrimento*: rottura a taglio, ma si tratta di murature, quindi non ci possiamo aspettare granché di diverso. Qui si tratta di rottura per scorrimento del letto di malta tra due corsi di mattoni;
- *taglio diagonale*: ancora taglio in una muratura, solo che in questo caso si vengono ad avere quelle bellissime lesioni diagonali a X che tanto spesso compaiono su foto e disegni nei testi di tecnica delle costruzioni. Quelle da manuale, appunto;

- *nodo*: si è rotto il nodo non confinato superiore o inferiore di un pilastro. Se non era armato allora era meglio se ci mettevamo un po' di staffe: alla fine si rompeva lo stesso ma durava un po' di più.

Come si fa ad andare avanti?

Abbiamo visto quali sono le diverse fasi da seguire, abbiamo capito di che si tratta, ma ci siamo anche resi conto che la struttura al primo tentativo con molte, moltissime probabilità non è verificata. Cosa fare allora? Una possibilità sarebbe quella di lasciarci prendere dallo sconforto e mollare tutto.

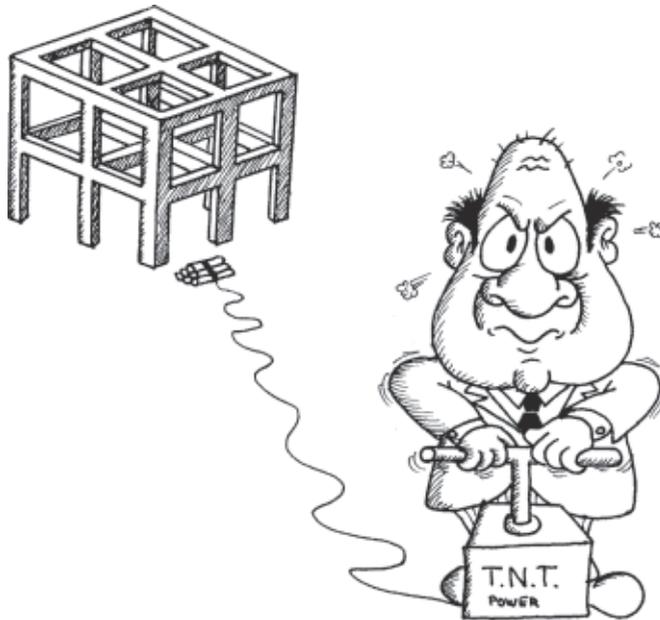


Figura 16. Soluzione drastica

La seconda, invece, consiste nel modificare qualcosa nell'input, sperando di avere azzeccato la strada giusta, e fare altri tentativi fino a quando le cose non cominciano ad andare come piace a noi. Se siamo orientati verso il secondo tipo di soluzione, allora il percorso deve essere di questo tipo:

- primo: trattare uno per volta i tre livelli di verifica (danno lieve, danno severo e collasso). Partiamo dal primo, finché non funziona, poi il secondo, stessa trafila, e infine il terzo (se poi scegliamo un ordine diverso è pure lo stesso, basta che alla fine tutto il terzetto al completo sia a

posto). Ah, dimenticavo, se si tratta di edifici in muratura o comunque di un calcolo per nuovo progetto, allora il terzo livello di verifica non va fatto (per il cemento armato o l'acciaio lo vediamo comparire lo stesso, perché il programma non sa, questo stupidotto, ma noi sappiamo che si tratta di edificio nuovo e quindi tiriamo dritto);

- secondo: se il livello non è verificato, andiamo a vedere dove c'è la magagna, perché ogni volta c'è un singolo elemento che non va bene, il primo su cui si verifica un certo problema, ed è quello che va aggiustato subito. Poi può succedere che il problema si inneschi da un'altra parte, e allora dobbiamo andare avanti fino a che la verifica generale è soddisfatta; si tratta di spostare il problema fino a quando siamo fuori dalla zona limite richiesta;
- terzo: abbiamo capito dove si verifica questo piccolo dramma, in un punto ben preciso di un'asta ben precisa (sui setti no, l'abbiamo detto). Per porre rimedio però dobbiamo capire cos'è successo. Allora visualizziamo i tipi di rottura. Se c'è una rottura per taglio dobbiamo evitarla, come la peste. Armature a taglio o sezioni più sostanziose.

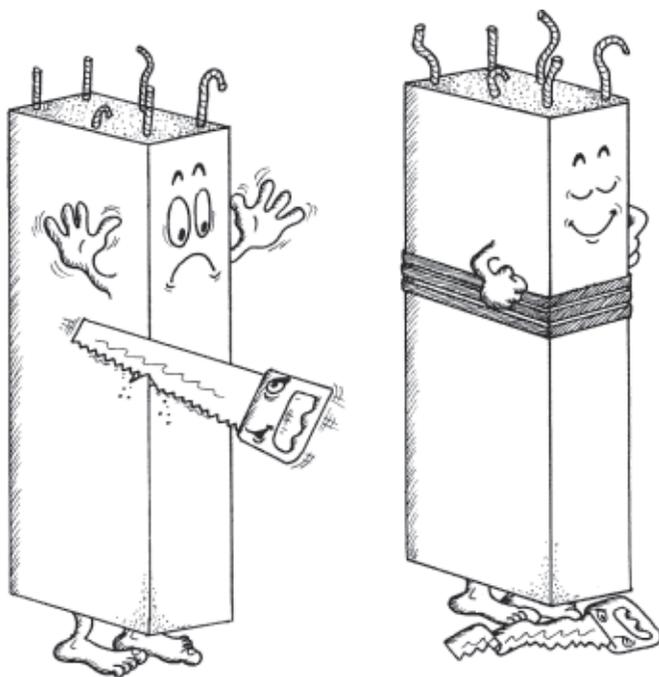


Figura 17. Un nuovo tentativo

O magari, se siamo non proprio dei pivellini, modificare qualcosa nei paraggi per fare in modo che tutto quel taglio lì non ci arrivi proprio (e attenzione alla torsione!). Se la rottura è per flessione in una trave a spessore, facciamo una telefonata al cliente dicendo che ci dispiace ma quella trave a scomparsa nel soffitto del suo salone proprio non la possiamo fare. Se poi ci sono troppe cerniere nei pilastri e pochissime sulle travi, è il caso di immaginare pilastri un po' più grossi e travi più "magre";

- quarto: ricalcolare il tutto come la prima volta, sperando che le cose comincino a migliorare. In caso contrario abbiamo preso una cantonata, forse ci era sfuggito un particolare o ci era sembrato di capire qualcosa che non era e abbiamo preso lucciole per lanterne. Niente di male, proviamo in un altro modo. Non sia mai detto che un ingegnere si arrenda senza combattere (commercialisti, avvocati e dottori forse possono farlo, ma gli ingegneri sicuramente mai!).

Perle di saggezza del perfetto progettista da pushover

1. Il calcolo pushover non è qualcosa di tremendo e incomprensibile;
2. con il calcolo pushover si possono riuscire a verificare edifici esistenti senza stravolgerli o progettare edifici ottimizzando la struttura, senza perdere in sicurezza;
3. progettando un edificio nuovo con un calcolo pushover sono sempre obbligato a verificare la struttura con le regole correnti per quanto riguarda le azioni dei carichi statici e i minimi di normativa (forma delle sezioni e armature). Il calcolo pushover invece mi garantisce per l'azione sismica, quindi non devo neppure eseguire la verifica allo stato limite di danno (quella degli spostamenti, per capirci);
4. mai usare pilastri in falso;
5. evitare come la peste le travi a spessore che portano solai. Usare quelle di collegamento con molta moderazione, solo se è strettamente necessario;
6. evitare situazioni di debolezza per taglio e torsione (aste tozze);
7. è meglio, molto meglio, che la struttura sia il più regolare possibile, in tutti i sensi;
8. è un'ottima cosa che le travi abbiano lo spessore minimo sufficiente a sopportare i carichi verticali, mentre per i pilastri è conveniente abbondare. Se abbondano con le travi mi metto nei guai da solo;
9. se si usano setti in grado di assorbire azioni sismiche, la cosa deve essere ben valutata a parte, perché pushover dei setti se ne fa un baffo.

Le figure 4.21, 4.22 e 4.23 rappresentano la curva di capacità di una struttura e lo spettro di domanda sismica dell'area geografica in cui si trova la stessa. La loro sovrapposizione produce un punto di intersezione che rappresenta il cosiddetto *performance point*, cioè la condizione in cui domanda e capacità coincidono (condizione ideale).

In altre parole, se la curva di capacità ha uno sviluppo tale da oltrepassare lo spettro di domanda, allora l'indice di vulnerabilità del fabbricato a cui la curva si riferisce ha un valore maggiore di 1, e ciò indica che lo stesso può essere considerato sismicamente adeguato; nel caso, invece, in cui la curva di capacità di arresta prima di incontrare lo spettro di domanda, allora l'indice di vulnerabilità dell'opera produce un valore inferiore all'unità, ad indicazione della non adeguatezza sismica della stessa, condizione che potrebbe richiedere il progetto di interventi finalizzati all'accrescimento della sua capacità.

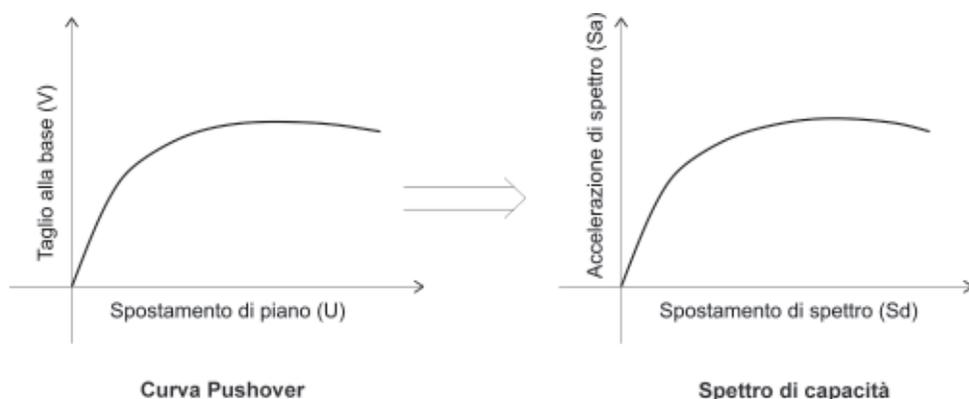


Figura 4.21. Curve di pushover

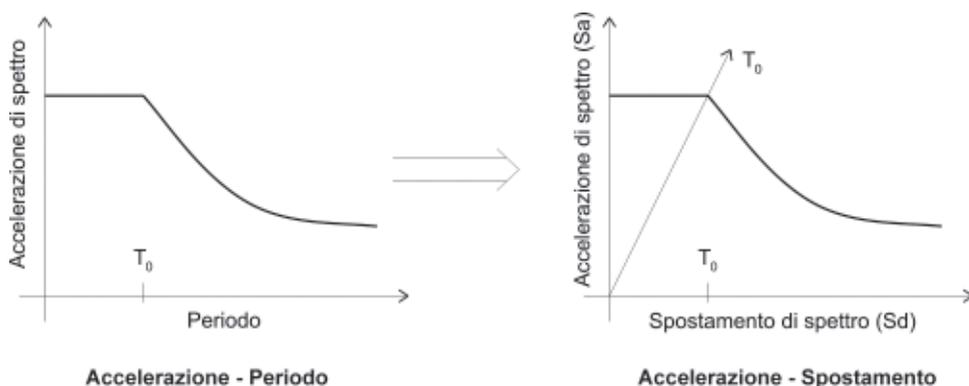


Figura 4.22. Spettro di domanda

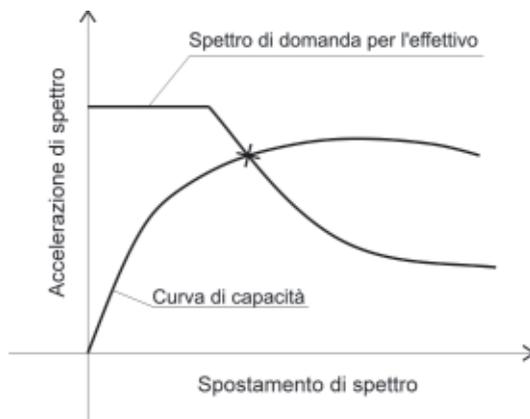


Figura 4.23. Performance point

4.6. Stati limite di verifica

Nei paragrafi precedenti si è visto come costruire la curva di capacità del fabbricato, che fornisce il valore della capacità strutturale in termini di accelerazione e spostamento, e di come convertirla nell'equivalente curva A.D.S.R., in cui, oltre alla capacità strutturale, è possibile valutare anche la domanda sismica del sito su cui l'edificio è posizionato. Su quest'ultima curva sono indicati diversi livelli di prestazione, in termini di capacità di spostamento, e bisogna verificare che la domanda di spostamento dovuto al sisma atteso per quel livello di prestazione sia inferiore alla capacità deformativa strutturale.

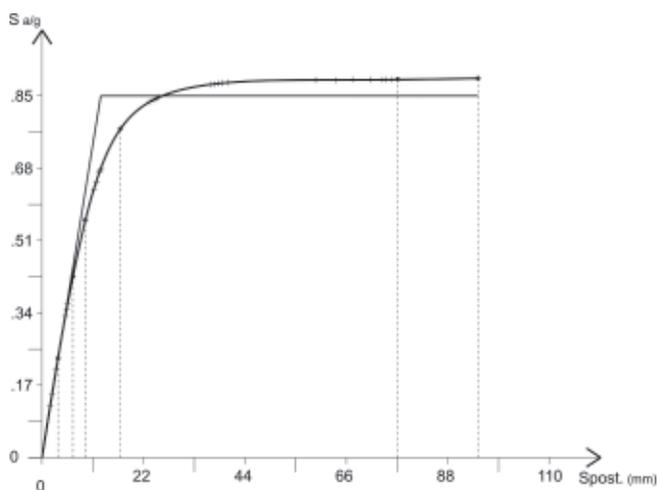


Figura 4.24. Curva A.D.S.R.

I diversi livelli di prestazione riportati sulla curva A.D.S.R. sono relativi a ciascuno stato limite considerato (S.L.O., S.L.D., S.L.V. e S.L.C.), ma non tutti vanno presi in considerazione: infatti, le N.T.C. 2008 prevedono che la valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti possono essere eseguiti con riferimento ai soli S.L.U. (cioè S.L.V. e/o S.L.C.), e comunque, nel caso in cui si effettui la verifica anche nei confronti degli S.L.E. (cioè S.L.O. e S.L.D.), i relativi livelli di prestazione possono essere stabiliti dal progettista di concerto con il committente. Inoltre, le verifiche agli S.L.U. possono essere eseguite rispetto alla sola condizione di salvaguardia della vita umana (S.L.V.) o, in alternativa, alla condizione di prevenzione del collasso (S.L.C.).

Quest'ultima condizione è però applicabile esclusivamente ad edifici in calcestruzzo armato e/o in acciaio, mentre lo stato limite di collasso non è valutabile per le opere in muratura.

Riassumendo in pochissime parole (per i pigri che non leggono mai l'intero paragrafo ma vanno direttamente alla frase finale nella speranza, qui soddisfatta, di trovare la risposta a tutti i loro problemi), la verifica di un fabbricato esistente può essere considerata soddisfatta semplicemente se lo è quella relativa allo stato limite di salvaguardia della vita (S.L.V.).

4.7. Numero collassi

Le curve di capacità e le correlate curve A.D.S.R. finora rappresentate hanno tutte un andamento sul genere di quelle contenute nella figura 4.25.

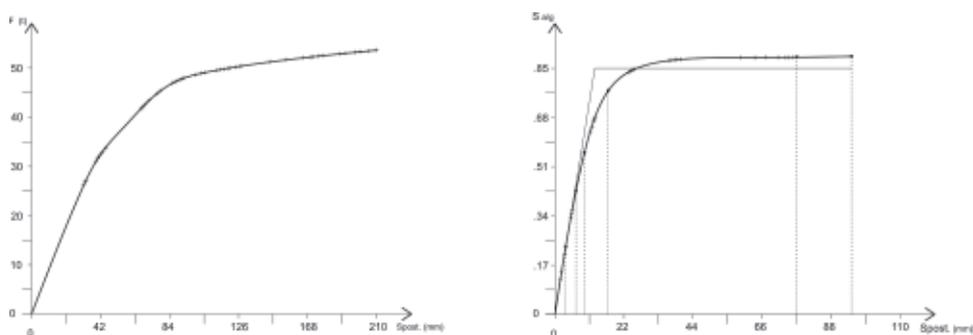


Figura 4.25. Curva di capacità e relativa curva A.D.S.R.

Tali curve, dopo il primo tratto lineare piuttosto ripido che descrive l'iniziale comportamento elastico della struttura in esame, hanno uno sviluppo

più o meno omogeneamente degradante e si arrestano in corrispondenza del primo collasso strutturale, cioè quando il primo elemento raggiunge il valore ultimo consentito in termini di deformazione plastica. In altre parole, quando un elemento si rompe, la struttura ha raggiunto il suo limite ultimo di utilizzo, e la curva si interrompe.

Questo è vero però soltanto per gli edifici il cui materiale costitutivo predominante è il calcestruzzo o l'acciaio, mentre la situazione è ben diversa per i manufatti in muratura. Infatti, la normativa ci autorizza, quando svolgiamo l'analisi pushover di un edificio avente sistema costruttivo in muratura, a non fermarci al primo collasso, ma ad andare oltre, ammettendo quindi lo svolgimento di un'analisi multi-collasso secondo la quale si può considerare ammissibile il comportamento strutturale anche dopo che qualche elemento componente abbia raggiunto il suo limite massimo di impegno deformativo (più di tanto non può sopportare, in termini di deformazione). Per cercare di essere più chiari e concreti, cosa che in questa pubblicazione si cerca il più possibile di fare, l'analisi pushover su un fabbricato con struttura portante in muratura va svolto in maniera classica (come per le opere in c.a.) fino al raggiungimento del primo collasso; dopo ciò bisogna ripartire dall'inizio, eliminando dal modello strutturale l'elemento che è andato in crisi e studiando una nuova struttura, ovviamente un po' più debole della precedente.

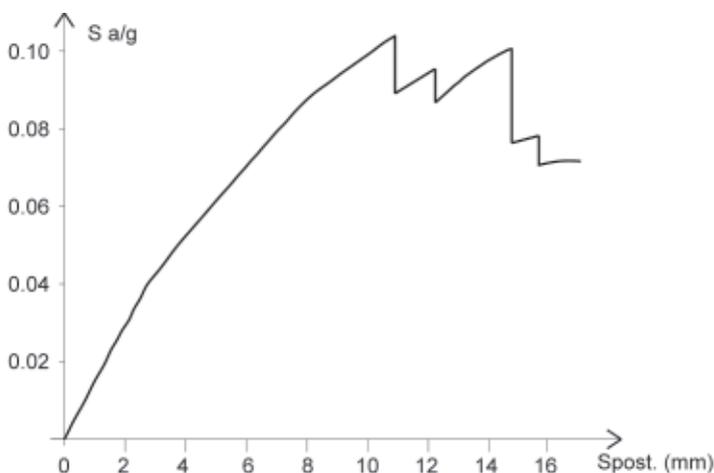


Figura 4.26. Curva di capacità "gradonata" per edifici in muratura

Questa nuova struttura produrrà una nuova curva di capacità differente da quella precedente (normalmente più bassa, dato che ci sono meno elementi

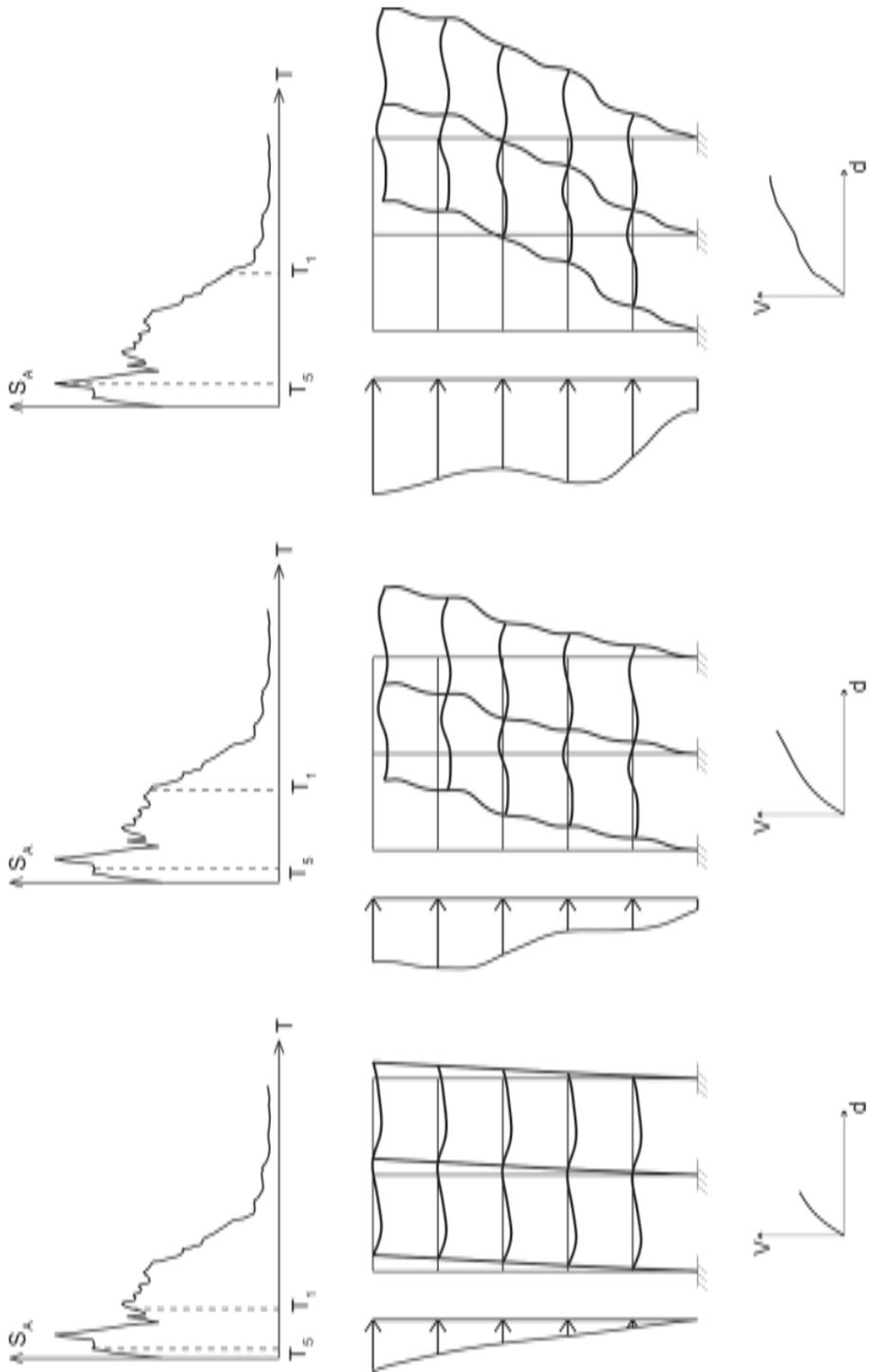


Figura 6.1. Pushover adattiva

dove

Γ_j^{k-1} : fattore di partecipazione modale

φ_{ij}^{k-1} : valore normalizzato della deformata relativa al piano i ed al modo j

m_i : massa del piano

$S_a(T_j^{k-1})$: amplificazione spettrale.

Con questo sistema vengono condotte analisi separate per ciascuna forma modale e gli effetti così calcolati vengono combinati col metodo S.R.S.S. ed infine sommati a quelli complessivi relativi al passo precedente.

Ma adesso fermiamoci qui, prima di scendere troppo sul teorico ed annoiare anche quei lettori che fino ad ora hanno resistito alla tentazione di collegarsi ad Internet e navigare un po' su qualche sito che propone vacanze ai Caraibi. Un'ultima cosa da dire, però, è che non bisogna dimenticare la natura originaria dell'analisi pushover, che nasce come una procedura alquanto articolata, ma comunque semplificata, fondata su ipotesi che ne facilitano l'utilizzo, del tipo: traduzione del modello complesso in uno elementare equivalente, riferimento ad un'unica forma modale, schematizzazione di cerniere plastiche concentrate, ecc. Quindi, forse è meglio non farsi prendere troppo la mano ed evitare di complicare a tutti i costi qualcosa che nasce per essere semplice; in fondo si è già visto che esistono già altri sistemi più complessi che sono già pronti per essere utilizzati (analisi dinamica non lineare, I.D.A., ecc.).

7. L'analisi pushover per gli edifici in muratura

7.1. La pushover per la muratura

L'analisi pushover, la stessa norma vigente lo dichiara, è il sistema più appropriato per lo studio degli edifici in muratura, dato che il materiale con cui sono composte tali opere ha un comportamento per sua natura non lineare, quindi perfettamente rappresentato da un'analisi dello stesso tipo. Il normatore è stato così generoso che addirittura, solo e soltanto per gli edifici con sistema costruttivo in muratura, ha ridotto o in alcuni casi del tutto eliminato taluni limiti di applicabilità della pushover.

Questo capitolo ha lo scopo di descrivere le modalità di applicazione dell'analisi pushover agli edifici in muratura e di evidenziarne le differenze rispetto all'analogo studio riferito ai fabbricati in c.a. o in acciaio.

7.2. Il modello ad aste

Per prima cosa bisogna ricordare cosa si è detto nei capitoli precedenti riguardo la presenza di pareti nei fabbricati da studiare tramite la pushover, ed esattamente che questa analisi prevede che il comportamento delle pareti armate contenute nella struttura sia, per tutta la procedura di incremento del tagliante orizzontale, indefinitamente elastico. Le travi ed i pilastri potranno plasticizzarsi ed eventualmente rompersi (solo uno di loro, dopodiché l'analisi si arresterà), ma i setti rimarranno, invece, sempre in campo elastico. Ovviamente questa ipotesi si scontra duramente con la natura dei fabbricati in muratura, costituiti prevalentemente o totalmente da pareti, e quindi da elementi che, a seguito di una analisi di questo tipo, rimarrebbero sempre in campo elastico, senza produrre mai la formazione di cerniere plastiche e quindi senza mai raggiungere un qualunque tipo di collasso. La modellazione della muratura risulta quindi un problema estremamente complesso che deve essere affrontato, per ottenere risultati realistici, con analisi in campo non lineare.

E allora cosa si fa? Il problema si risolve traducendo ciascun elemento bidimensionale verticale (parete) in un corrispondente sistema di elementi monodimensionali (travi, pilastri e connettori rigidi), cioè sostituendo il modello a shell con un modello equivalente ad aste.

La modellazione con elementi “beam anelastici” è semplice ed affidabile anche per lo studio di strutture di tipo misto (muratura e c.a.), essendo infatti questo schema in grado di simulare perfettamente l’interazione tra i diversi materiali.

Questa forma di schematizzazione ha immediato e costante riscontro nelle N.T.C. 2008:

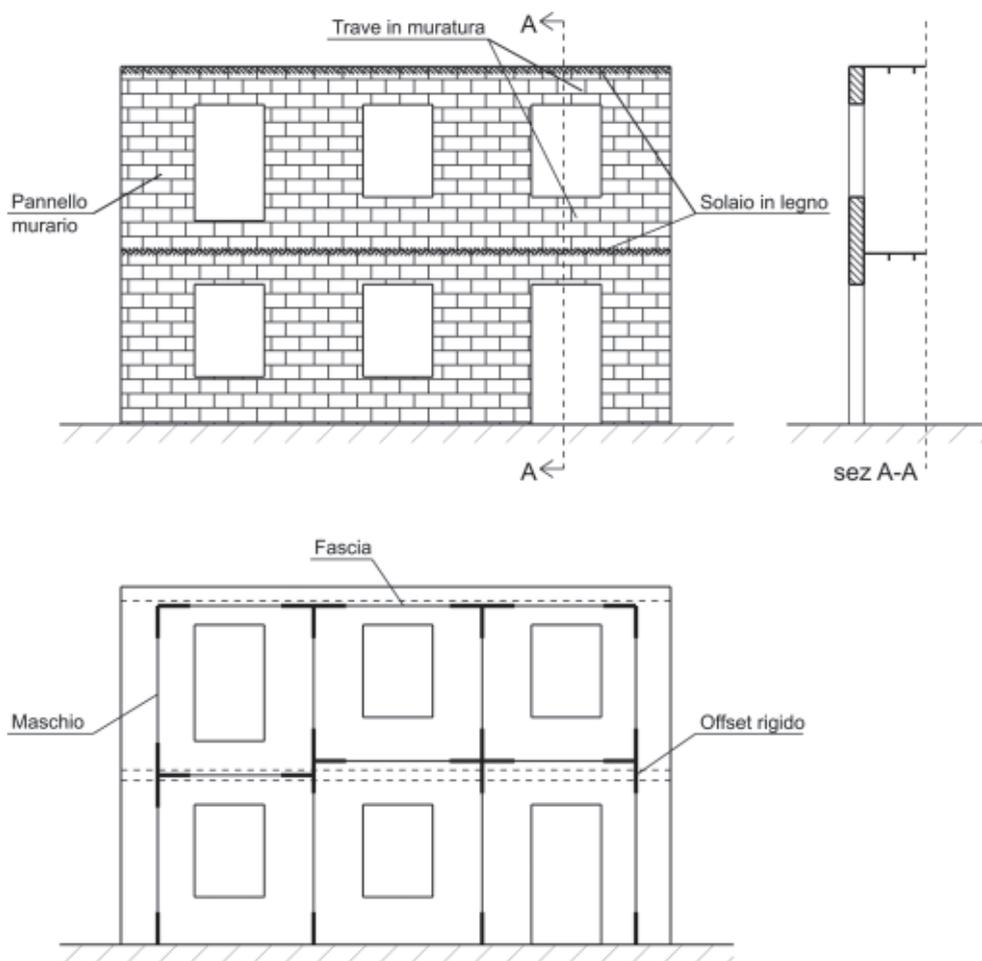


Figura 7.1. Schema ad aste del modello SAM

8.1.5.2 – *Analisi statica lineare* [...] In presenza di elementi di accoppiamento l'analisi potrà essere effettuata utilizzando modelli a telaio, in cui le parti di intersezione tra elementi verticali e orizzontali potranno essere considerate infinitamente rigide.

8.1.5.3 – *Analisi dinamica modale* [...] Vale quando riportato per la statica.

8.1.5.4 – *Analisi statica non lineare* Il modello geometrico della struttura potrà essere conforme a quanto indicato nel caso di analisi statica lineare ovvero utilizzando modelli più sofisticati purché idonei e adeguatamente documentati.

Esistono in letteratura diverse modellazioni equivalenti ad aste, ma la più diffusa è sicuramente quella sviluppata da Magenes e Calvi, ideatori del cosiddetto *metodo SAM*, che prevede di schematizzare una parete forata usando elementi beam non lineari a plasticità concentrata deformabili sia a flessione che a taglio. La formulazione del metodo, originariamente prodotta soltanto per sistemi bidimensionali (singola parete), è stata successivamente estesa al caso tridimensionale (intero fabbricato).

La figura 7.1 rappresenta una parete di un fabbricato in muratura ed il suo schema equivalente ad aste, tradotto come previsto dal modello SAM, in cui, come già detto, i muri a taglio (maschi murari che si sviluppano per l'intera altezza della parete) e le travi di accoppiamento (elementi orizzontali di architrave al di sopra delle aperture) vengono modellati per mezzo di aste in muratura, fra di loro connesse da link rigidi.

7.2.1. Il metodo SAM

Il metodo SAM, il cui nome è l'acronimo di *Simplified Analysis Method*, è un codice di calcolo per l'analisi statica non lineare a macroelementi di edifici in muratura soggetti ad azione sismica. Il metodo è stato sviluppato per la muratura ordinaria non armata, ma si è dimostrato applicabile anche a quella armata. Il metodo prevede una modellazione tridimensionale a macroelementi costituita da elementi semplici di tipo asta (beam), quindi monodimensionali, in cui la struttura è schematizzata secondo un telaio equivalente costituito da:

- elementi ad asse verticale (maschio murario);
- elementi ad asse orizzontale (fascia muraria o trave di accoppiamento).

Si è verificato che questo tipo di schematizzazione risulta particolarmente attendibile nel caso in cui la geometria delle pareti e in particolar modo la distribuzione delle aperture in esse presenti siano caratterizzate da una buona regolarità.

8. Applicazione dell'analisi pushover sugli edifici nuovi

8.1. Edifici nuovi

Si è già detto che l'analisi pushover è nata per lo studio di fabbricati esistenti, per la valutazione della loro vulnerabilità sismica e per la verifica del raggiungimento dello stato di adeguamento o di miglioramento sismico, ma la sua natura consente di estendere la sua applicazione anche ad edifici nuovi, parzialmente o totalmente nuovi.

In questo capitolo si descriveranno le tipologie e modalità di applicazione della pushover in riferimento al nuovo, aprendo (si spera) al professionista orizzonti nuovi nel campo della progettazione strutturale, sempre nel rispetto delle moderne direttive tecniche vigenti, che gli consentano di esprimere al meglio le proprie capacità e di intervenire in questa fase in maniera attiva, e non più passiva, come spesso si è costretti a fare.

8.2. Sopraelevazioni o aggiunte strutturali

Questa prima applicazione dell'analisi pushover in realtà si riferisce ad edifici solo "parzialmente" nuovi: riguarda infatti lo studio di modifiche strutturali che consistono nell'aggiunta di porzioni di fabbricato a opere già esistenti. Si tratta ovviamente di porzioni di fabbricato connesse alla parte preesistente, poiché, nel caso invece in cui la struttura da aggiungere fosse indipendente da questa, cioè dotata di un giunto sismico adeguatamente dimensionato, la stessa andrebbe trattata come opera indipendente totalmente nuova e seguirebbe quindi la classiche procedure di progettazione previste nelle N.T.C. 2008 per gli edifici nuovi.

Se, invece, l'aggiunta consiste nella costruzione di qualcosa di strutturalmente connesso al fabbricato esistente, come ad esempio la sopraelevazio-

ne che la signora dell'ultimo piano ha deciso di realizzare, abbagliata dalle promesse del politico di turno che le ha fatto credere di poter chiudere, con il pagamento di qualche centinaio di euro, la terrazza di copertura e finalmente far avverare il sogno di ottenere una stanza in più per i bambini, allora la situazione si complica decisamente, scattando l'obbligo di adeguamento sismico dell'intero edificio, come previsto al punto 8.4.1. delle N.T.C. 2008, che si riporta di seguito.

8.4.1 Intervento di adeguamento

È fatto obbligo di procedere alla valutazione della sicurezza e, qualora necessario, all'adeguamento della costruzione, a chiunque intenda:

- a) sopraelevare la costruzione;
- b) ampliare la costruzione mediante opere strutturalmente connesse alla costruzione;
- c) apportare variazioni di classe e/o di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%; resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;
- d) effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

In ogni caso, il progetto dovrà essere riferito all'intera costruzione e dovrà riportare le verifiche dell'intera struttura post-intervento, secondo le indicazioni del presente capitolo.

La chiusura della terrazza dell'ultimo piano rientra inevitabilmente nel punto a), o, se anche fosse solo parziale, eventualmente nel punto b), non si scappa.

Quindi potete iniziare a riferire alla signora che, se è intenzionata a far stare più comodi i bambini, ormai cresciuti, deve prima di tutto mettere d'accordo tutti i condomini, compreso l'antipatico ingegnere del terzo piano, spiegando loro che la sopraelevazione implica l'adeguamento sismico dell'intero fabbricato e che, per poter svolgere una verifica di questo tipo, è necessario effettuare un sufficiente numero di prove sui materiali; non risulta plausibile che i suddetti condomini accolgano entusiasticamente l'idea di farsi fare un bel carotaggio sul pilastro del salone o farsi estrarre un tondino dalla trave che sovrasta la finestra della cucina. Per non parlare poi dei quasi inevitabili interventi strutturali necessari a rendere l'edificio sismicamente sicuro. Forse è meglio cercare un'altra casa più spaziosa.

Ma cosa fare, nel caso in cui il proprietario del fabbricato fosse unico o i condomini fossero tutte persone estremamente comprensive e altruiste?

PRIMA FASE

La prima fase è quella conoscitiva, che consiste quindi nel rilievo geometrico del fabbricato esistente e nella valutazione delle caratteristiche dei materiali utilizzati, tutte informazioni necessarie per la modellazione della porzione di struttura già esistente. Si ricorda che, se si tratta di c.a., fra le informazioni da reperire ci sono anche quelle relative alle quantità e disposizioni di armatura dei vari elementi strutturali.

SECONDA FASE

Il modello strutturale va implementato con la porzione nuova, quella ancora da realizzare, ma di cui conosciamo benissimo la geometria ed i materiali, dato che ovviamente la stiamo progettando noi.

TERZA FASE

La terza fase consiste nel progetto della parte nuova, secondo le normali prescrizioni previste dalle N.T.C. 2008, tenendo ovviamente conto che non si tratta di una struttura indipendente ma che è connessa ad un'altra, di cui bisogna quindi tenere conto in fase di modellazione (sarebbe errato studiare la porzione nuova di fabbricato come se fosse a se stante, e quindi staccata da quella preesistente).

QUARTA FASE

Dopo avere progettato le armature della porzione nuova, adesso entra in campo l'analisi pushover; infatti, come si è detto sopra, scatta l'obbligo di adeguamento sismico del fabbricato, per cui bisogna verificare che l'insieme strutturale, formato dalla parte preesistente e da quella nuova, soddisfi i requisiti previsti dalle norme. In altre parole, è come se si verificasse un edificio totalmente esistente, una parte del quale in realtà è esistente solo in senso virtuale, dato che la abbiamo appena progettata.

QUINTA FASE

Nel caso in cui le 16 analisi pushover svolte non diano tutte esito positivo (eventualità decisamente molto probabile), bisogna progettare gli inter-

Bibliografia

Norme Tecniche per le Costruzioni, Roma 2008.

Consiglio superiore dei lavori pubblici, *Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008*, Roma 2008.

Albanesi T., Nuti C., Vanzi I., «A Simplified Procedure to Assess the Seismic Response of Nonlinear Structures», *The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, Roma 2000.

Biondi A., *Strutture in cemento armato. Dalle tensioni ammissibili agli Eurocodici passando per gli stati limite*, Dario Flaccovio Editore, Catania 2002.

Biondi A., *Progettazione antisismica degli edifici. Normativa sismica a confronto*, Dario Flaccovio Editore, Catania 2003.

Biondi A., *Strutture in muratura. Dal metodo POR alle Norme Tecniche per le Costruzioni*, Dario Flaccovio Editore, Catania 2005.

Biondi A., *Le nuove N.T.C. 2008 – Guida pratica. Come cambia la progettazione strutturale*, Dario Flaccovio Editore, Catania 2009.

Binici B., *Pushover Analysis: an Inelastic Static Analysis Method*, 1975, Ankara (Turkey).

Chopra A.K., Goel R.K., *Development and Application of Nonlinear Static Procedures for Plan-Asymmetric Buildings*, edd. G. Adhikari, R. Pinho, IUSS Press, Berkley, California (U.S.A.) December 2010.

Esposito E., Bruni G., *L'analisi Pushover come strumento di conoscenza*, Reggio Calabria 2013.

Fiori M., Savoia M., Vincenzi L., *Analisi Pushover di strutture in muratura tridimensionali rinforzate con materiali FRP*, Bologna 2007.

Gupta B., Kunnath S.K., «Adaptive Spectra-Based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures», *Earthquake Spectra*, vol. 16(2), Pasadena (U.S.A.) 2000.

Magenes G., Calvi G.M., *Cyclic Behaviour of Brick Masonry Walls*, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid (Spain) 1992.

Magenes G., Calvi G.M., «In-Plane Seismic Response of Brick Masonry Walls», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, University of Pavia 1997.

Vamvatsikos D., Cornell C.A., *Incremental Dynamic Analysis*, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California (U.S.A.) 2002.