

POR 2000

Analisi di un Edificio in Muratura

**Calcolo, Controllo dei Risultati Globali, Verifiche dei
Meccanismi Locali e Proposte di Interventi di
Miglioramento Sismico
secondo le Ntc**

NEWSOFT

www.newsoft-eng.it

Premessa

Nel presente documento si affrontano le problematiche connesse alla valutazione della capacità portante di un edificio esistente in muratura e ai possibili interventi di miglioramento sismico. La struttura dell'edificio viene modellata con Por 2000, software specifico per il calcolo, l'analisi e la verifica di strutture in muratura ordinaria e armata soggette all'azione sismica. Il software effettua l'analisi pushover, le verifiche sismiche per gli stati limite di danno, salvaguardia della vita e collasso e tutte le verifiche locali delle murature in accordo con le NTC 2008.

Per la diversità dei contenuti presentati il documento viene suddiviso nelle seguenti parti:

- ✓ Analisi di un edificio esistente con Por2000;
- ✓ Risultati analisi statica;
- ✓ Risultati Analisi sismica;
- ✓ Interventi di rinforzo.

Parte I. Analisi di un edificio esistente con POR 2000

Introduzione

Il fabbricato in questione è una casa in muratura portante a due teste, con disposizione a blocco in pietra tufacea, situata in una zona di medio-alta sismicità. L'edificio originario è stato nel tempo sopraelevato con l'edificazione di un nuovo piano, costruito in muratura di mattoni semipieni. L'intero edificio si presenta privo dei presidi sismici, quali cordoli e tiranti, tipici delle murature in zona sismica.

Con l'intenzione di valutare la sicurezza ai fini sismici ed eventualmente proporre interventi mirati al miglioramento sismico dell'edificio originario si illustrano le fasi di lavoro, i limiti tecnici e le problematiche inerenti l'intera fase del calcolo strutturale, dagli interventi preliminari di rilievo e dalla caratterizzazione dei materiali al modello di calcolo e all'analisi critica dei risultati numerici.

Il principio alla base degli interventi mira a preservare l'aspetto formale/architettonico e la gestione degli spazi interni e quindi, evitando l'inserimento di nuovi elementi strutturali, risulta interessante sia dal punto di vista tecnico e sia dal punto di vista economico.

La fase del calcolo strutturale viene preceduta dall'attenta analisi dello stato attuale, con rilievo accurato della geometria, localizzazione delle strutture portanti e del tipo, individuazione dei particolari costruttivi auspicabili in zona sismica (presenza di morse ai martelli, diatoni tra i paramenti di muro, cordoli, catene), rilievo degli stati fessurativi presenti, indotto dalle sollecitazioni e dagli eventi sismici del passato.

I risultati delle analisi svolte suggeriscono inequivocabilmente quali sono le problematiche strutturali da risolvere e di conseguenza le modalità di intervento.

Gli interventi di miglioramento proposti mirano alla messa in sicurezza dell'edificio mediante tecniche di tipo tradizionale, reversibili e sostenibili. Verrà posta particolare attenzione all'esecuzione dei particolari costruttivi in zona sismica.

Il documento propone quindi un esempio di progettazione di interventi di consolidamento su un edificio esistente in muratura. La descrizione dei punti principali, con commenti e considerazioni tecniche, segue la logica dell'intervento auspicabile, in linea generale, per le strutture in muratura in zona sismica.

Descrizione dell'edificio

L'edificio da analizzare rappresenta una tipica casa rurale, costruita nel secolo scorso a base di blocchi di tufo assemblati per formare murature a due teste ed un solo livello. La struttura muraria originale in pietra di tufo, a testimoniare la presenza di una cava nei dintorni, è stata oggetto in epoca relativamente recente di una sopraelevazione per l'aumentata necessità di nuovi spazi. Pertanto si è costruito un nuovo livello con muratura di mattoni semipieni e chiusura a base di tetto in legno a doppia pendenza. Diverse e fondate motivazioni, legate per un verso alla scarsa qualità di esecuzione dei lavori di sopraelevazione e per l'altro alla nuova zonizzazione sismica italiana unita all'aumentata sensibilità dei proprietari al rischio sismico, richiedono uno studio esaustivo dell'immobile per la determinazione del livello di sicurezza sismico, per l'individuazione delle vulnerabilità presenti e per una eventuale proposta di interventi volti al miglioramento sismico.

Si descrivono in questa sezione quelle proprietà caratterizzanti l'edificio, che permettono considerare il modello di calcolo coerente alla realtà fisica dell'organismo strutturale. Esse sono:

1. le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali, quali pareti, aperture, solai, falde inclinate;
2. i tipi di materiali utilizzati e le tipologie costruttive;
3. i collegamenti, le connessioni e i dettagli costruttivi presenti.

Le caratteristiche geometriche: la restituzione di un accurato rilievo di campo fornisce le dimensioni plano altimetriche delle pareti con i rispettivi spessori, le dimensioni delle aperture ed il loro posizionamento, il tipo di architrave, le dimensioni degli elementi costituenti i solai, classificati per tipo, dimensione dei travetti, interasse. Per i travetti dei solai, con un semplice saggio, si misura la lunghezza di appoggio nelle pareti utile per determinare l'eccentricità di scarico dei solai.

Con le informazioni precedenti si esegue il modello numerico dell'edificio visualizzando le piante, le pareti e le viste prospettiche.

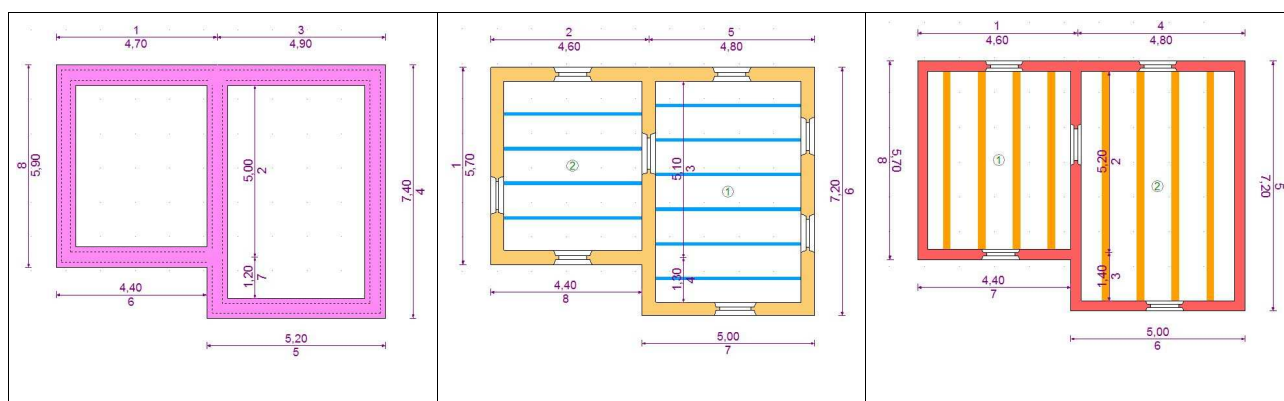


Figura 1: pianta fondazioni, 1° e 2° livello.

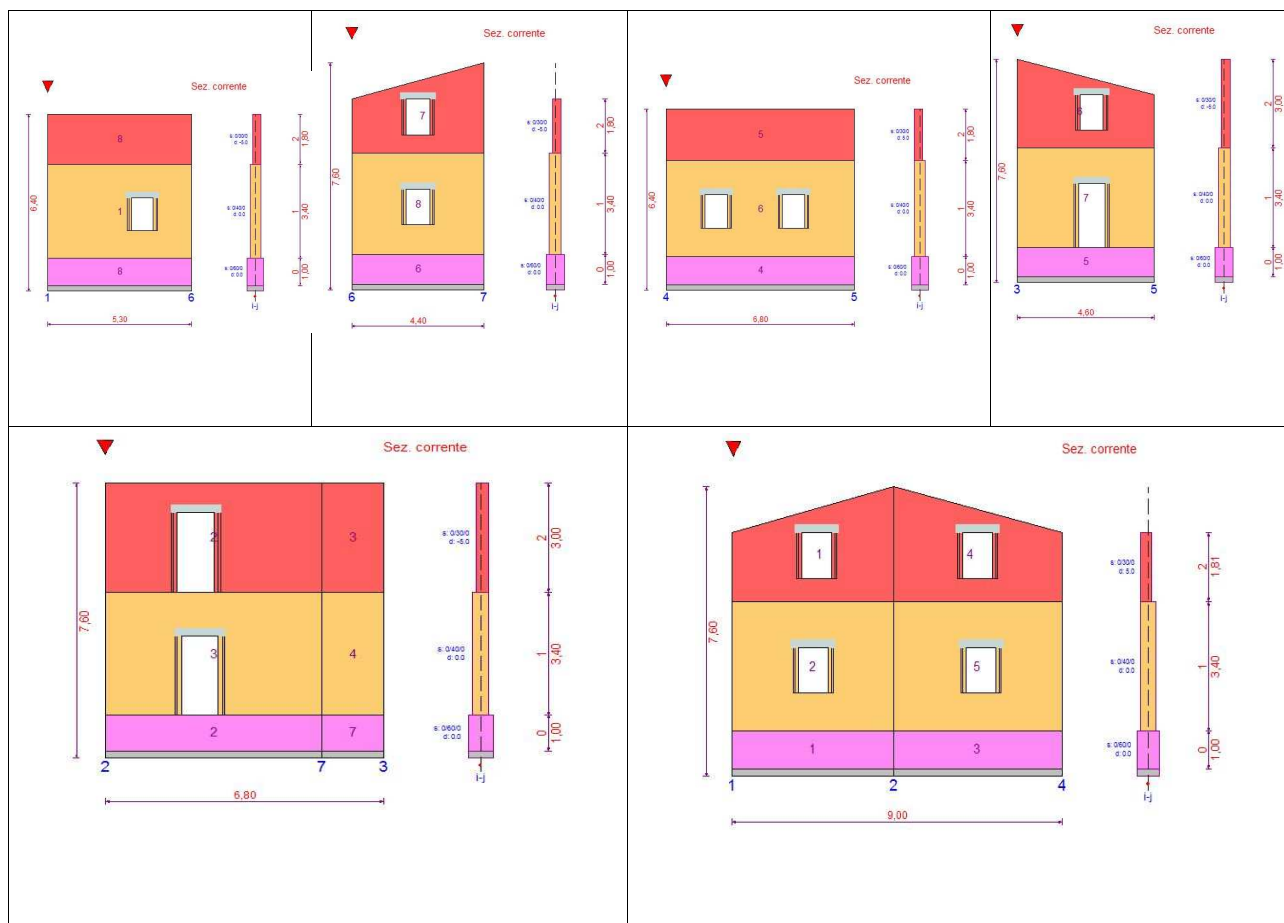


Figura 2: vista delle pareti.

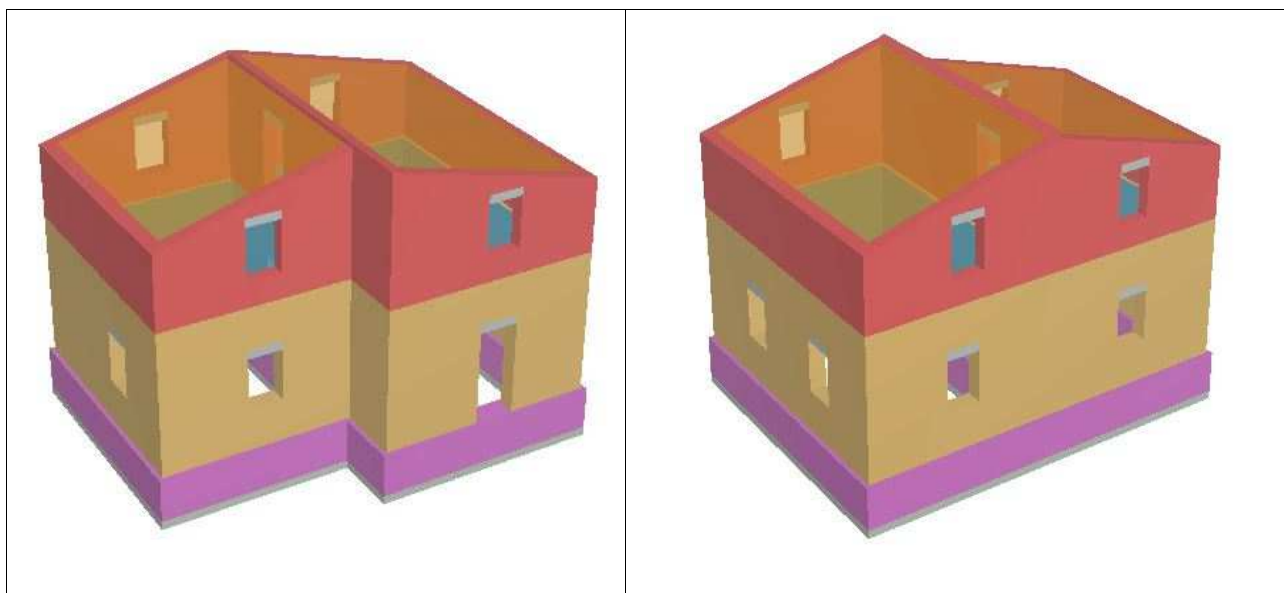


Figura 3: viste solide 3D.

I tipi di materiali: nella fase di campo alcuni semplici saggi sulle pareti, consistenti nell'eliminazione dell'intonaco su una superficie sufficientemente ampia, permettono il riconoscimento visivo del tipo di muratura, il grado di ammassamento tra i due paramenti, le caratteristiche della tessitura muraria (regolare o caotica), le caratteristiche dei giunti di malta in base alle dimensioni e al tipo di

malta. Quest'ultima può essere testata con semplici prove di scalfitura considerando p. es. una malta dalle scarse qualità meccaniche quella friabile con la sola pressione delle dita.

I valori delle caratteristiche meccaniche delle murature per edifici esistenti dovrebbero essere stimati in base ai risultati di prove sui materiali anche di tipo distruttivo. Per edifici di modeste dimensioni, formati da pareti di diverse tipologie, la campagna di prove può rappresentare una spesa difficilmente ammortizzabile. Proprio per ovviare a questa casistica, per alcune tipologie di murature, la normativa consente una deroga purché i valori delle caratteristiche meccaniche siano coerenti alla tabella C8A.2.1 della Circolare n.617 del 2 febbraio 2009 – Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni.

Per i solai si individuano il tipo e le caratteristiche, gli stati fessurativi e di conservazione, specie se trattasi di vecchi solai in legno. Il legno infatti è un materiale sensibile alla temperatura e all'umidità ambientale e pertanto non idoneo a tutti gli ambienti. P. es. in ambienti umidi si creano le condizioni favorevoli per gli attacchi di funghi che compromettono la conservazione degli elementi lignei. In questi casi le caratteristiche dovrebbero essere valutate mediante prove specialistiche accompagnate dagli opportuni interventi di risanamento.

Gli architravi sulle aperture saranno oggetto di valutazione per quanto riguarda il tipo, le dimensioni, la superficie di appoggio e l'eventuale stato di danno. Caso per caso si valuterà la possibilità del ripristino idoneo a garantire la trasmissione dei carichi o la sostituzione dell'elemento.

I collegamenti, le connessioni e i dettagli costruttivi: una volta individuati i maschi murari con l'eventuale presenza di lesioni (rottura dei blocchi) e redatto il corrispondente quadro degli stati fessurativi, si individuano i particolari di esecuzione della muratura. All'intersezione/incrocio di due o più pannelli murari si verifica la connessione mutua, assicurata dalla presenza di morse e per i singoli maschi si determina il grado di connessione dei paramenti in base alla presenza o meno di elementi trasversali (diatoni). In questo modo, si classifica la muratura come avente un alto grado di connessione trasversale, p.es. nel caso di elementi regolari accoppiati nelle due direzioni per formare una parete a due teste eseguita a regola d'arte, o come avente uno scarso grado di connessione trasversale p.es. nel caso di murature a sacco.

In corrispondenza del solaio di piano, oltre al tipo, alle caratteristiche, alla dimensione dei travetti, all'interasse, all'appoggio del travetto nella muratura perimetrale, si verifica la presenza di cordolo e se presente si rileva il tipo, le dimensioni e il modo di unione.

Sulla base delle informazioni acquisite nel processo conoscitivo si individua il “livello di conoscenza” dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, materiali e dettagli costruttivi) e dei rispettivi fattori di confidenza da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello.

Dati edificio

Sulla base dell'esperienza di campo il progettista, con le dovute considerazioni legate p. es. all'assenza di prove esaustive, alla presenza di stati fessurativi localizzati, alla classe d'uso dell'edificio, considera le seguenti caratteristiche, intese come valori medi al trattarsi di edificio esistente, per la generazione del modello numerico:

Fondazione realizzata sotto le pareti portanti con pietrame disordinato e malta per una larghezza media di 0,60 m e una profondità di 1m.

Piano terra realizzato in muratura di blocchi tufacei, dello spessore di 40cm, con un grado di ammorsamento medio, alla quale si attribuiscono le caratteristiche meccaniche della tab. 1:

Ammorsamento tra paramenti:	grado medio
Resistenza a compressione:	30,0 Kg/cm ²
Resistenza tangenziale:	0,5 Kg/cm ²
Modulo elastico normale E:	12.000 Kg/cm ²
Modulo elastico tangenziale G:	3.000 Kg/cm ²

Tabella 1: Caratteristiche meccaniche muratura al 1° livello.

I solai sono realizzati con travetti di acciaio della serie IPE 160, disposte ad interasse di 1 metro e con soletta superiore di 4cm. Le caratteristiche si elencano nella tab. 2:

Cordoli perimetrali:	assenti
fattore di ripartizione trasversale:	0,05
Peso proprio:	260 Kg/cm ²
Carico permanente:	100 Kg/cm ²
Carico accidentale:	200 Kg/cm ²

Tabella 2: Caratteristiche dei solai al 1° livello.

Piano primo realizzato in muratura di blocchi in laterizio semipieno, spessore 30 cm, con un grado di ammorsamento medio, alla quale si attribuiscono le caratteristiche meccaniche della tab. 3:

Ammorsamento tra paramenti:	grado medio
Resistenza a compressione:	35,0 Kg/cm ²
Resistenza tangenziale:	2,0 Kg/cm ²
Modulo elastico normale E:	30.000 Kg/cm ²
Modulo elastico tangenziale G:	8.000 Kg/cm ²

Tabella 3: Caratteristiche meccaniche muratura al 2° livello.

I solai al 2° livello sono realizzati con travi principali in legno 20x20 disposte ad interasse di 1 metro, travetti secondari e tavolato superiore di 4cm. Le caratteristiche si elencano nella tab. 4:

Cordoli perimetrali:	assenti
fattore di ripartizione trasversale:	0,25
Peso proprio:	150 Kg/cm ²
Carico permanente:	80 Kg/cm ²
Carico accidentale:	100 Kg/cm ²

Tabella 4: *Caratteristiche dei solai al 2° livello.*

Il fattore di ripartizione trasversale dei carichi, che varia tra 0 ed 1 per tenere in conto un comportamento completamente unidirezionale o bidirezionale relativamente alla distribuzione dei carichi verticali alle pareti portanti del perimetro, viene valutato come rapporto tra le rigidezze degli elementi principali e secondari in funzione del tipo di collegamento.

Il livello di conoscenza assunto è LC1 (basso) e pertanto, nella fase di calcolo, le resistenze medie delle murature vengono ridotte per il fattore di confidenza pari a 1,35.

Interventi preliminari

Per assicurare il comportamento scatolare della struttura muraria bisogna garantire l'ammorsamento tra pareti ai martelli e se carenti o assenti ripristinarli adeguatamente. L'ammorsamento può essere conseguito con l'inserimento di diatoni naturali o artificiali o semplicemente, in caso di muratura regolare, con l'inserimento di mattoni di testa alternati realizzando la tipica cucitura muraria.

Nei punti di rotture locali della muratura bisogna ripristinare la muratura (tecnica "scuci-cuci") ed eliminare la causa del dissesto.

In presenza di strutture spingenti, come archi, cupole e falde inclinate, occorre eliminare la spinta statica orizzontale con tirantature adeguatamente ancorate.

Definizione azione sismica

L'edificio ricade in una zona a medio-alta sismicità (Accelerazione massima attesa al suolo $p_{ga}=0.25g$, dall'acronimo inglese di *peak ground acceleration*). La relazione di pericolosità sismica di base, redatta dal tecnico competente, definisce, in base alla velocità di propagazione delle onde di taglio nei 30m sottostanti, un suolo di tipo C avente conformazione topografica pianeggiante (T1).

Il programma permette definire le coordinate geografiche del sito e settare i parametri per la definizione dell'input sismico oltre alle opzioni di analisi secondo il contesto normativo scelto.

The figure shows three windows from a software interface for seismic analysis. The first window, 'Contesto Normativo', shows the selection of the seismic norm 'Ntc 2008 / Dpcm3274'. The second window, 'Parametri sismici Ntc 2008', contains detailed site and building parameters, including location (Lat./Long. 39.815, 16.200), building type (2 ordinario), and various seismic coefficients. The third window, 'Opzioni di analisi Ntc 2008', shows options for static analysis, pushover analysis, and knowledge levels, with values like 1.00 for static analysis factors and 0.05 for equivalent viscous coefficient.

Figura 4: Contesto normativo, definizione dell'azione sismica e settaggio delle opzioni di analisi.

Analisi

Si esegue l'analisi e il programma, oltre alle verifiche statiche, effettua l'analisi statica non lineare (o pushover) per le direzioni scelte in fase di input dati e per gli stati limite di interesse, secondo le disposizioni della normativa tecnica.

L'analisi pushover rappresenta un'analisi di tipo incrementale con carichi verticali costanti e carichi orizzontali crescenti fino al collasso della struttura. Per i carichi orizzontali si utilizzano le distribuzioni costante e lineare in altezza in accordo alle prescrizioni delle Ntc. Per il collasso degli elementi si tengono in conto i meccanismi di pressoflessione e taglio con un modello elasto-plastico a duttilità limitata (per ulteriori approfondimenti si rimanda al manuale).

Le analisi vengono condotte per le combinazioni prescritte dalle norme con i relativi coefficienti di combinazione delle azioni permanenti e accidentali come riportati nella tab. 5:

id	Nome combinazione	S.limite	Pe min	Pe max	Pr min	Pr max	Va min	Va max	Sis + -	Psi
1	Statica locale	SLU	1,00	1,30	0,90	1,20	0,00	1,50	0,00	1.0/psi0
2	Statica fondazioni	SLU	1,00	1,30	0,90	1,20	0,00	1,50	0,00	1.0/psi0
3	Sismica locale	SLV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	psi2/psi2
4	Sismica fondazioni	SLV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	psi2/psi2
5	Sismica pushover	SLD/SLV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	psi2/psi2

Tabella 5: Combinazione di carico e relativi coefficienti di combinazione delle azioni.

Una sintesi dei risultati si riporta nelle tabelle in fig. 5.

Le verifiche statiche, condotte per la combinazione delle azioni Statica locale, evidenziano leggere criticità legate all'eccentricità trasversale e di conseguenza alla pressoflessione trasversale.

La prima verifica in accordo alle disposizioni normative (DM96 e NTC08) limita l'eccentricità e , derivante dagli scarichi dei solai, da difetti di esecuzione e da eventuali spinte orizzontali dovute a falde inclinate, al valore di un terzo dello spessore della muratura t ($e < t/3$).

La verifica a presso-flessione statica trasversale confronta la tensione nominale di compressione, opportunamente ridotta per un fattore funzione della snellezza del setto e dell'eccentricità, con quella limite della muratura ($\sigma_{lim} = \sigma_k / \gamma_m$). Ovviamente per valori di $e > t/3$ non può essere condotta la verifica a pressoflessione e il setto compare come “non verificabile” come conseguenza dell'eccessiva eccentricità trasversale. A parte queste criticità le verifiche statiche risultano soddisfatte, con impegni variabili dal 41% della pressoflessione longitudinale al 70% delle fondazioni ed all'85% per la snellezza convenzionale. La verifica a ribaltamento statico porta in conto la spinta dovuta all'inclinazione della falda di copertura.

Le verifiche sismiche vengono condotte sia in ambito locale per la determinazione dei meccanismi fuori piano (pressoflessione e ribaltamento) e della portanza in fondazione, sia in ambito globale per la determinazione della capacità con analisi pushover. Ogni verifica viene condotta per la combinazione delle azioni corrispondente (rif. tab. 5) e per ogni combinazione l'utente può assegnare i coefficienti di combinazione delle azioni che vengono settati di default ai minimi suggeriti dalle Ntc. Nella tabella si riportano per le verifiche globali eseguite con analisi pushover e per gli stati limite selezionati i valori di domanda e capacità in termini di accelerazioni al suolo e il relativo fattore di sicurezza. I valori non evidenziati (in ombra) si riferiscono a stati limite non selezionati per l'analisi.

Per le verifiche locali e per lo stato limite di interesse (SLV) si riporta il rispettivo fattore di sicurezza¹ definito come:

$$f_{a,SLV} = a_{a,SLV} / a_{g,SLV}$$

in cui:

$a_{a,SLV}$ è l'accelerazione al suolo (Pga) che porta al raggiungimento dello stato limite Slv, riferita alla categoria di sottosuolo A (rappresenta quindi la capacità in termini di accelerazione massima al suolo o Pga)

$a_{g,SLV}$ è l'accelerazione al suolo (Pga) richiesta dalla normativa per lo stato limite Slv, riferita alla categoria di sottosuolo A (rappresenta quindi la domanda in termini di Pga).

¹ Fattore di accelerazione secondo le varie ordinanze di ricostruzione dei paesi colpiti dal sisma o bandi regionali per l'assegnazione di contributi finalizzati al miglioramento sismico degli edifici esistenti.

Quadro verifiche statiche	
Fattori di impegno delle verifiche statiche locali	
Verifica	SLU
Snellezza	0.85
Eccentricità trasversale	1.02
Eccentricità longitudinale	0.00
Pressoflessione trasversale	1.20
Pressoflessione longitudinale	0.41
Taglio longitudinale	0.00
Ribaltamento pareti	0.50
Portanza fondazioni	0.70

Quadro verifiche sismiche				
Fattori di sicurezza per verifiche sismiche locali				
Verifica	SLD	SLD	SLV	SLC
Pressoflessione trs.	---	---	0.09	---
Ribaltamento pareti	---	---	0.09	---
Portanza fondazioni	---	---	2.72	---
Fattori di sicurezza per verifiche sismiche globali (pushover)				
Verifica	SLD	SLD	SLV	SLC
Pga: capacità [g]	0.19	0.24	0.31	0.35
Pga: domanda [g]	0.07	0.09	0.25	0.33
Fattore di sicurezza	2.74	2.63	1.26	1.07
Fattori di struttura del sistema equivalente (pushover)				
Verifica	SLD	SLD	SLV	SLC
F.struttura ($f_e/f_y \leq 3$)	0.53	0.68	1.56	1.85

Figura 5: Tabelle di sintesi delle verifiche statiche e sismiche.

Bibliografia

[1] D.M. 14 gennaio 2008. Norme tecniche per le costruzioni.

[2] Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.

[3] Manuale d'uso Por 2000, Versione 8. Progetto e verifica di edifici in muratura.