

CRITERI DI PROGETTO DEL CONSOLIDAMENTO DELL'ESISTENTE

Considerazioni estratte dai volumi “Fondazioni” Ed. Hoepli (Homepage - Formazione)

Pierfranco Ventura

1 – Premessa

Il progetto di consolidamento dell'esistente differisce notoriamente sensibilmente dal progetto di nuove costruzioni in cui l'aleatorietà dei materiali e delle azioni, indotte dagli spostamenti geotecnici e sismici, si può ben prevenire per rispettare i criteri di sicurezza semiprobabilistici.

In proposito si richiama che nell'iterazione terreno-struttura in campo statico sono consentiti cedimenti differenziali inferiori a 2,5 cm, potendo accettare per l'esistente la riduzione delle azioni cinematiche per adattamenti viscosi nel tempo.

In presenza di azioni sismiche, specie cumulate nel tempo, si fa invece affidamento su strutture con adattamenti resilienti che consentono spostamenti dell'ordine 1/300 dell'altezza della costruzione e della lunghezza della fondazione.

Le sollecitazioni cinematiche indotte da tali spostamenti in esercizio sono in pratica trascurabili nelle nuove costruzioni progettate a regola d'arte, mentre possono essere sensibili in costruzioni esistenti specie vetuste e che hanno superato tante traversie.

In proposito si evidenzia che i programmi di calcolo basati su appoggi di livello in fondazione forniscono specie in elevazione delle sollecitazioni errate: è necessario contemperare l'interazione terreno-struttura, specie in campo sismico con tutti i 6 spostamenti e rotazioni permanenti vincolari.

Tali calcoli, prevenuti per le nuove costruzioni da valide fondazioni e dimensioni antisismiche, sono invece spesso non fattibili nel caso del consolidamento, specie delle costruzioni in muratura. Comunque i valori degli spostamenti differenziali ed il relativo quadro fessurativo vanno rilevati in sito per valutare la sicurezza.

2 - Criteri di Calcolo

I criteri di adeguamento sismico basati solo su programmi di calcolo dinamici non lineari e sugli spettri di accelerazione dei danni, valutati come economicamente mitigabili, senza misurare i dati resistivi struttura-terreno in zona sismica, possono fornire delle sicurezze illusorie.

In proposito coprire le incertezze con valutazioni probabilistiche basate solo su dati teorici virtuali, specie massimizzando le azioni a numeratore e minimizzando le resistenze a denominatore dei criteri di sicurezza, soprattutto con tempi di ritorno secolari, fa arrivare rapidamente a valutazioni della perdita di sicurezza da “cigno nero” ed a costi proibitivi degli interventi. Tali valutazioni si basano sugli approcci stocastici del risk management nati da modelli della teoria dei giochi ideati da famosi scienziati però spesso privi di etica; la stessa intelligenza artificiale è un “pappagallo stocastico” (Bender e Gebru) e la sua grande potenza aiuta ma non sostituisce l'uomo.

Soprattutto per il consolidamento dell'esistente lo storico insegnamento della *Statica Grafica*, e della *Geometria delle Masse*, specie per Architetti, va decisamente conservato e il *calcolo manuale* deve precedere e poi ratificare il calcolo matriciale automatico, come prescritto nel §10.2 delle NTC2018 per fornire un *giudizio motivato di accettabilità* basata sull'attendibilità dei risultati ottenuti.

L'ipotesi di *rigidità* dei materiali, condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la sicurezza, che invece deve contemperare i criteri di limitare le deformabilità, consente però di valutare la distribuzione *equilibrata dei vettori* pesi e delle inerzie dei vari elementi strutturali, per cui le norme richiedono le verifiche EQU delle risultanti ($R = 0$, $M = 0$), a base del predimensionamento (S.d.C.). Si evidenzia che il criterio di adeguamento sismico basato solo sulla duttilità delle murature trascurando la *coesione della malta*, senza desumerla dalla *calcimetria* (calce > 25%), ovvero

Ventura: Criteri di progetto del consolidamento dell'esistente

considerano la *malta totalmente degradata con $c = 0$* , condurrebbe ad interventi di consolidamento resilienti ibridati forzatamente con quelli tipici del cemento armato.

Analogamente con fondazioni su terreni coesivi saturi, la cui unica resistenza sismica è solo quella della coesione non drenata c_u , desunta da $(w_L - w_P)/C_c$ (Schofield e Wroth), essendo l'attrito $\phi_u = 0$, assumendo per il terreno $c_u = 0$, si desumerebbe un crollo certo in caso di terremoto.

Si richiamano inoltre le storiche verifiche basate su un *fattore $\eta = 5$ di sicurezza deterministica per le murature* calcolato come rapporto fra la resistenza per coesione $c \cdot s$ e l'azione sismica ondulatoria pseudostatica dell'ordine $mg/3$: già con $c > 10 \text{ kPa} = 1 \text{ t/m}^2$, ovvero la minima resistenza a taglio della malta $f_{vk0} = 100 \text{ kPa} = 10 \text{ t/m}^2$, ovvero non sottoposta ad alcuna compressione (Eurocodice ECC6 graficizzato in figura), e spessori $s > 50 \text{ cm}$ ben ammorsati per congrua lunghezza l , consentono di non mettere fuori norma costruzioni in muratura, specie monumentali in zona sismica.

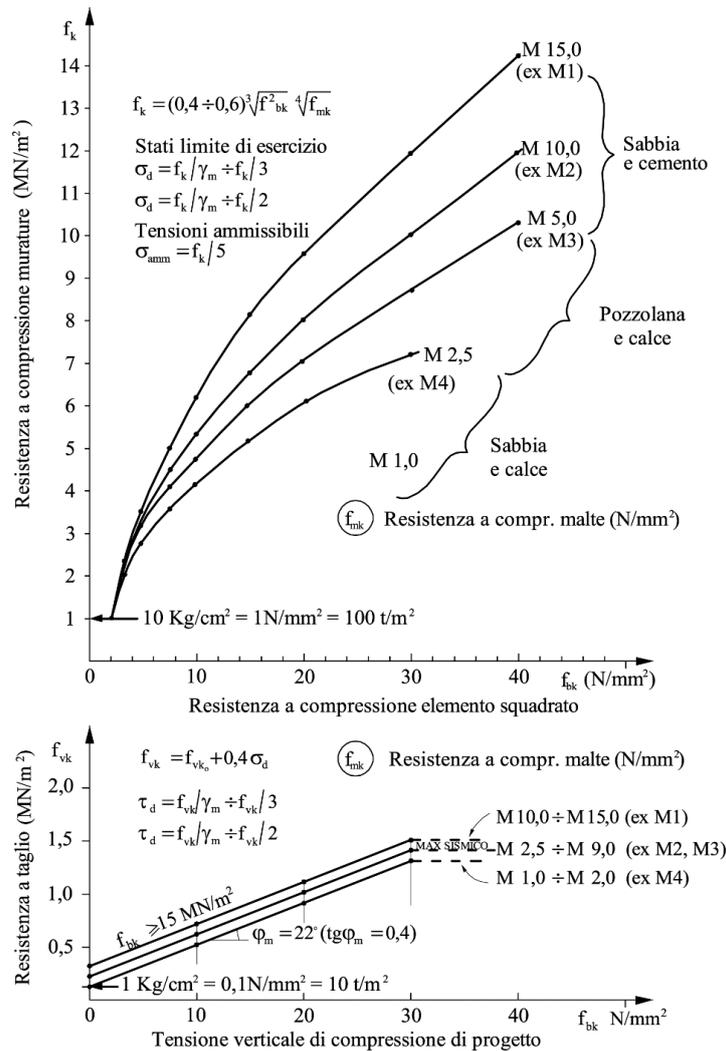


Figura 5.41 Resistenza di murature a compressione f_k ed a taglio f_v in base ad elementi quadrati di varia resistenza caratteristica f_{bk} e per vari tipi di resistenze della malta f_{mk} (Eurocodice EC6, tabulate §11.10.3NTC2018) e resistenze di progetto τ_d in condizioni statiche e sismiche (tab. 9.1)

Verifiche analoghe valgono per i nodi dei telai in c.a. basate sull'ingrandimento del nocciolo d'inerzia causato da una congrua frazione della *resistenza a trazione ciclica coesiva*, come per le verifiche delle murature "non armate": assumere $f_{tc} = 0$, anziché dell'ordine di $50 \text{ kPa} = 5 \text{ t/m}^2$, significa che nodi di congrue dimensioni, staffati "staticamente" e rinalzati da resistenti tamponature o da nuove spallette, pur funzionando come capitelli, non risulterebbero staffati a norma.

Tali criteri di progetto “coerenti con la coesione”, *cenerentola semiprobabilistica*, sono rimasti più usuali per le verifiche a scorrimento dei muri a gravità che per le strutture, peraltro presidiando limitati spostamenti.

Si evidenzia inoltre che le valutazioni degli spostamenti sono più dirette e significative usando lo *spettro degli spostamenti* anziché quello delle accelerazioni, ben più suggerito e prescritto in dettaglio nelle norme NTC2018.

Infatti gli spostamenti anelastici permanenti $\delta > 20$ cm, specie *differenziali* $\Delta + \Delta\delta > \mp 10$ cm a terra, si verificano con magnitudo $M > 6$ per periodi sismici $T_D - T_E \gg T_B - T_C$ in cui invece gli anelastici possono essere resi equivalenti agli elastici solo se le strutture presentano periodi propri $T_C < 0,8$ secondi (≈ 1 Hz). Di conseguenza calcoli in presenza di spostamenti $\delta > 20$ cm a terra vanno prevenuti anzitutto con la regolarità strutturale; consolidamenti solo duttili per incrementare il fattore di struttura ($q > 1,5$) in modo da bilanciare l'incremento dello spettro di accelerazione specie desunto dai rilievi microsismici ($\Delta S_a/g > 50\%$), comportano modelli di calcolo del c.a., o meglio dell'acciaio, che *non vanno ibridati per murature affatto duttili* e sottoponendole ad aleatorietà delle accelerazioni a cui hanno dimostrato di resistere con successo.

Il numero poi dei provini di norma per controllare le resistenze del c.a. si basa su un *indice di variabilità*, rapporto fra la dispersione della deviazione standard e l'intensità del valore medio misurato, $v_x < 0,3$ meno severo di quello prescritto per la resistenza delle murature, che invece è fattibile solo con prove *in situ*, come va fatto anche per il c.a., ovvero non su provini solo prima del getto. Si ricorda che $v_x < 0,2$ garantisce il *collaudo in opera* di un valido cantiere.

Si evidenzia inoltre che la grande potenzialità dei moderni criteri di calcolo della sicurezza, può essere usata per l'esistente in modo *retrogressivo*, basandosi su parametri d'input statisticamente misurati: ciò sia validamente tratti da monitoraggi su casi simili a quello in esame, sia soprattutto basati su dati monitorati in sito con il *metodo osservazionale*. La sperimentazione va estesa nel tempo per controllare l'efficacia del consolidamento, con grafici digitalizzati in continuo fino al collaudo, specie tramite misure geodetiche di precisione.

Criteri di progettazione per il consolidamento delle murature di tipo *navale*, ovvero di idonee rigidzze specie in fondazione, può consentire di “galleggiare” durante spostamenti sismici rilevanti ($T_C > 0,8$) e che sfuggono ad ogni criterio di consolidamento resiliente equivalente all'elastico.

Ciò notoriamente si basa sul “*rocking*” anziché sul “*tilting*”: torre di Pisa docet.

3 – Criteri di Consolidamento

Il consolidamento dell'esistente spazia da quello specifico del patrimonio storico, con particolare riguardo alla conservazione delle vestigia archeologiche, fino all'esistente molto degradato in cui è conveniente la demolizione e ricostruzione antisismica anche con la massima classe energetica.

Anzitutto è notoriamente essenziale il *rilievo della struttura portante e del quadro fessurativo*, in particolare separando le interazioni con i rivestimenti architettonici, peraltro ottimamente dettagliati dai moderni rilievi laser ed utilissimi per interpretare e valutare il Restauro.

Il classico esame della regolarità struttura-terreno tramite l'equilibrata distribuzione inerziale delle masse è poi particolarmente utile per prevenire gli effetti torsionali, possibilmente tendendo ad annullare le eventuali eccentricità dei carichi ed i momenti d'inerzia centrifughi, in particolare realizzando nuovi muri e imbotti, chiudendo aperture che indeboliscono la struttura e demolendo le superfetazioni.

L'analisi dell'interazione terreni strutture esistenti è poi importante svolgerla *retrogressivamente* basandosi specialmente sui rilievi geodetici di “*non orizzontalità*” e di “*non verticalità*” in modo da valutare gli effetti degli *spostamenti differenziali misurati* sia geotecnici sia sismici pregressi e i conseguenti contributi per valutare le cause dei danni e stabilire gli interventi di consolidamento.

Particolarmente utili sono inoltre le *ricerche d'archivio* che consentono ad esempio di evitare interventi su fondazioni ben realizzate e invece magari rilevare carenze storiche in elevazione.

Sull'esistente monumentale intervenire con gli isolatori in fondazione, dovendo tagliare tutta la base per inserire un sandwich strutturale, appare come un vero e proprio sventramento, inoltre si verificherebbe la necessità di vincoli ausiliari per il vento e la necessità di sostituire isolatori rovinati da sismi cumulati molto frequenti in Italia.

Realizzare invece una *rigidezza di tipo navale* in particolare tramite una trincea d'ispezione perimetrale consente il controllo sistematico dello stato delle fondazioni. La trincea permette nuovi rifacimenti murari o placcaggi e permette anche di ricostruire la rete fognaria e di raccolta dei pluviali o di realizzare intercapedini rinforzati con setti trasversali forati per la circolazione dell'aria in modo da prevenire l'umidità o in particolare realizzare un alleggerimento a compenso dei carichi se ci sono cedimenti differenziali del terreno in atto. Ciò peraltro in assenza di risalita della falda acquifera, che altrimenti comporterebbe opere provvisorie di dewatering, totali complesse impermeabilizzazioni e contrappesi della sotto-spinta archimedeica; analogamente non sono indicati scavi in presenza di risalite acquifere in zone in pendio per evitare frane o addirittura opere di intercettazione e di drenaggio di sorgenti emergenti.

Fondazioni profonde su micropali subiscono poi sollecitazioni sismiche rapidamente passibili di rottura; se inoltre i micropali vengono parzialmente localizzati si esaltano i danni, sarebbe come gettare le ancore in un mare in tempesta.

Iniezioni mirate soprattutto alle lesioni passanti, possono sostituire il ben più valido impiego dello storico "scuci e cucì" nella muratura fessurata inserendo mattoni anche con tutti e 6 i versi che bloccano i corrispondenti 6 gradi di libertà. Si sconsigliano invece le iniezioni in terreni limo-argillosi passibili di *claquage* e di aumento dei cedimenti differenziali.

Altrettanto sconsigliabile è il consolidamento con intonaci armati monolaterali o a sandwich non cuciti trasversalmente o comunque localizzati tanto da alterare la distribuzione delle rigidezze e consentire al sisma di accanirsi sulle parti più rigide fino ad accrescere i danni.

Nel caso di strutture in c.a. si può accrescere la rigidezza della fondazione, progettandola (§ 2) per galleggiare come una nave, in particolare dotandole di rinforzi ben distribuiti anti-torsione, prendendo lo spunto dall'antica spera che i marinai gettavano a poppa durante le tempeste per evitare d'infrangersi contro gli scogli a terra.

Naturalmente le strutture in elevazione devono essere regolari per rimanere "trasportate" dalle fondazioni e ben collegate come ad esempio le murature armate che evitano le tamponature in blocchetti nei telai sistematicamente espulse durante i terremoti, specie quando non sono ben rinalzate in sommità.

Altrettanto notoriamente tutta la problematica su *scala idrogeologica e geosismica* precede ogni consolidamento strutturale. Le predette critiche riguardanti l'opinabilità delle analisi stocastiche virtuali, anziché basate su *misure in sito*, sono decisamente in tali campi ancor più necessarie.

La complessa analisi dinamica dell'interazione terreno-struttura ciclica, consiste nel fare il lavoro opposto a quello degli accordatori degli strumenti musicali, ovvero allontanarsi con i periodi propri dalla risonanza con i periodi del terremoto. Si evidenzia che però si schermano in tal modo i $\Delta\delta$ ondulatori e sussultori smorzabili ma non gli *spostamenti Δ permanenti del terreno*, specie con innalzamenti od abbassamenti *decimetrici* o di aperture spesso rilevanti di faglie in superficie, come hanno rilevato con precisione i satelliti. Si richiama in proposito che in Nuova Zelanda le faglie specie aperte in superficie sono state adibite a viali alberati privi di costruzioni.

In casi speciali il compenso e la rigidezza navali possono consentire *spostamenti maggiori dei resilienti*, e salvare una flotta di borghi esistenti, superando i dimensionamenti non lineari di norma. Ciò si è attuato con successo anche su frane in lentissimo movimento, poi bloccate regolando il deflusso delle oscillazioni piezometriche e stabilizzando con sistemazioni a verde.

In ogni caso per evitare consolidamenti non basati solo su congetture (stocastiche in greco), va attivata la *diagnostica sperimentale* e la *manutenzione periodica*, come per la nostra salute e quella del portafoglio; secondo il proverbiale "chi più spende meno spende".