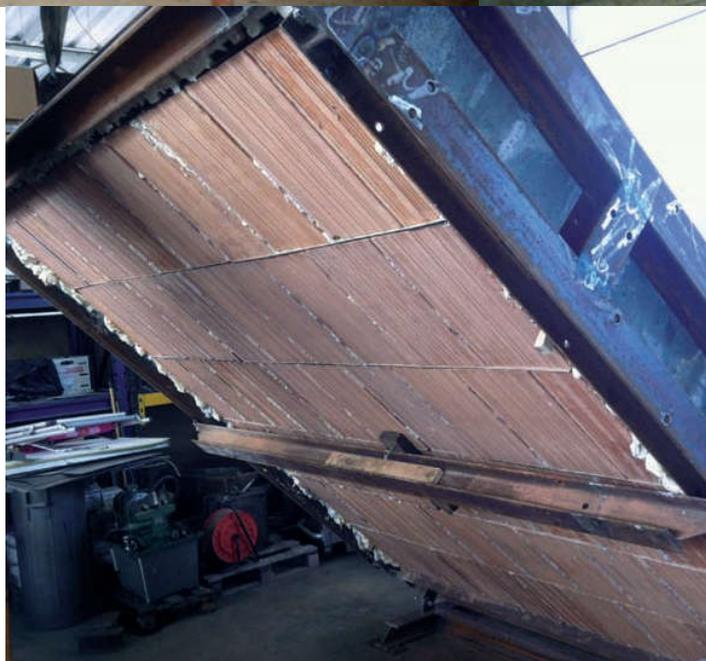


## ANTISISMICA

il percorso progettuale per la  
riqualificazione dell'esistente,  
dall'indefinibile definizione  
di sicurezza fino al *concept*,  
in equilibrio tra cogenze  
normative e buon senso

GIORGIO MONTI



MODULO PAROLE CHIAVE

ANTISISMICA – STATO DI FATTO – RAFFORZAMENTO SISMICO – SICUREZZA SISMICA



Nella pagina a fianco in alto, applicazione di sistema CAM su pareti murarie. In basso, prove di ribaltamento in laboratorio su parete PlastiLink.

In questa pagina sopra, prelievo di una carota di calcestruzzo da un pilastro, a destra, rilievo della fondazione.

Le fasi in cui si articola lo studio della sicurezza sismica di una costruzione esistente sono tre: valutazione dello stato attuale, progettazione dell'eventuale intervento di rafforzamento sismico, validazione dell'efficacia di tale intervento. Esaminiamo ogni singolo aspetto, poiché è bene che il professionista si ponga le giuste domande e sviluppi in piena autonomia gli strumenti necessari a pervenire alle giuste conclusioni.

Per quanto riguarda la valutazione dello stato attuale va ricordato che non esiste una definizione assoluta di sicurezza sismica. Essa è infatti misurata rispetto ad uno o più livelli prestazionali, o stati limite. È noto che la normativa vigente, la cosiddetta NTC-08, identifica quattro diversi livelli prestazionali: operatività, contenimento del danno, salvaguardia della vita umana, prevenzione del collasso. Ad ogni stato limite corrisponde una diversa entità dell'azione sismica, via via crescente. Si comprende, quindi, che la valutazione della sicurezza di una costruzione esistente – ed il susseguente progetto di rafforzamento – ricada nell'ambito della progettazione multi-obiettivo: per azioni sismiche basse, legate a terremoti frequenti, la costruzione deve possedere adeguata rigidità, così da non danneggiarsi; per azioni sismiche più rare, e quindi più intense, deve possedere adeguata resistenza, così da limitare il danneggiamento; per azioni sismiche rarissime, quindi molto intense, deve invece possedere adeguata duttilità, per poter assorbire gli spostamenti indotti dal terremoto senza collassare.

Ha senso quindi parlare di sicurezza rispetto a uno o più prefissati livelli prestazionali. Ad esempio, un edificio esistente potrebbe essere in grado di soddisfare entrambi i requisiti di contenimento del danno e di salvaguardia delle vite umane in esso contenute, ma non quello di prevenzione del collasso. Sta al committente e al progettista decidere di comune accordo se il rispetto di questi due requisiti sia da considerarsi sufficiente oppure se è il caso di intervenire per far sì che anche il terzo sia rispettato.

## Rigidità, resistenza e duttilità, una sorta di trinità dell'antisismica, elementi indivisibili ed essenziali nella stessa misura

Già da queste indicazioni si comprende come la valutazione della sicurezza sismica di una costruzione esistente debba riferirsi a tre aspetti fondamentali: la rigidità, la resistenza e la duttilità. Queste proprietà sono tutte ugualmente importanti al punto che il professionista non dovrà mai considerarle scisse e non dovrà mai curarne una a discapito delle altre. Troppo spesso si sentono dichiarazioni del tipo: "La costruzione è crollata perché non era abbastanza elastica"; ebbene, alla luce di quanto detto sopra, è facile convincersi dell'assurdità (e dell'incompetenza) di una tale asserzione.

Progettazione dell'intervento. La prima questione che il progettista generalmente si pone, è se perseguire l'adeguamento o il miglioramento della costruzione. È forse superfluo ricordare che l'adeguamento sismico mira a condurre la costruzione ai livelli di sicurezza previsti per le nuove costruzioni; se ciò non è possibile, sia perché l'entità degli interventi sarebbe tale da stravolgere l'impianto strutturale, sia perché le condizioni economiche non lo consentono, è allora opportuno perseguire il miglioramento sismico.

Sono, queste, due diverse scuole di pensiero, entrambe supportate dalla Normativa vigente, la quale però è reticente rispetto ad una conseguenza non trascurabile, ossia: perseguendo il miglioramento – ed è bene che il progettista ne sia pienamente consapevole – si accetta un rischio maggiore per la costruzione in esame.

Questo punto è particolarmente importante: infatti, nel miglioramento, l'azione sismica di riferimento da impiegare nelle verifiche è più bassa; ne consegue che, nel periodo di vita della costruzione, è più alta la probabilità che si abbia un evento sismico più forte di quello per cui essa è stata progettata. Ciò può condurre a maggiori danni se non, addirittura, al collasso della costruzione. Vediamo di capire perché.

Si ricordi che il terremoto è un fenomeno naturale descrivibile solo in termini di probabilità. Il modo in cui la nostra Normativa, prima al mondo, definisce l'azione sismica, è esattamente questo: nel progetto del nuovo o nella verifica dell'esistente, l'intensità del terremoto da usare è quella che ha un'assegnata probabilità di essere superata nel corso di un dato periodo di riferimento. Si capisce quindi come, per definire l'intensità del terremoto, occorrono due dati: la probabilità di superamento e il periodo di riferimento. Più bassa è la probabilità di superamento, più alta sarà l'intensità, poiché i terremoti più intensi sono anche i meno probabili. Più ridotto è il periodo di riferimento, più bassa sarà l'intensità, poiché in archi temporali più brevi i terremoti meno intensi prevalgono in numero rispetto a quelli più intensi.

La probabilità di superamento è in realtà fissata dalla Normativa per ogni livello prestazionale; ad esempio, per lo stato limite di salvaguardia della vita, essa è pari al 10%: questo significa che, progettando un intervento di rafforzamento per quell'intensità, il professionista deve essere consapevole che c'è una probabilità del 10% che, nel periodo di riferimento, si presenti un terremoto di maggiore intensità rispetto a quello impiegato nel progetto. Il 10% rappresenta quindi il rischio accettato dalla Normativa, e quindi dalla collettività, rispetto alla salvaguardia delle vite umane, nel periodo di riferimento.

Fissata quindi la probabilità, occorre definire il periodo di riferimento. Anche in questo caso, la Normativa fornisce una direttiva: per le costruzioni "convenzionali", esso si ottiene dalla vita nominale, pari ad almeno 50 anni, moltiplicata per un coefficiente che tiene conto della destinazione d'uso e che, per costruzioni di particolare rilevanza strategica, può arrivare fino a raddoppiarla.

Per le costruzioni convenzionali, senza particolare valenza strategica, si ha dunque che il terremoto con cui si esegue il controllo del requisito di salvaguardia della vita è quello che ha una probabilità del 10% di essere superato in intensità in un arco di tempo di 50 anni.

È interessante notare che variare il periodo di riferimento significa variare il rischio accettato annualmente. Se si decide di perseguire il miglioramento, si ridurrà l'intensità dell'azione sismica di verifica riducendo il periodo di riferimento; questo però implicherà un aumento del rischio annuale. Riducendo, ad esempio, il periodo da 50 a 30 anni, si ha che il rischio annuale aumenta da circa 0,20% a circa 0,33%, quindi più di una volta e mezza. Un tale progetto di miglioramento ha dunque una probabilità annuale di fallimento più di una volta e mezza maggiore rispetto ad uno di adeguamento.

## I prerequisiti per un buon progetto: adeguare e migliorare. Procedure e strategie per modificare il comportamento degli edifici

Le normative attuali insistono su alcuni principi inderogabili, gli errori grossolani vanno eliminati; le forti irregolarità degli edifici (in termini di resistenza e/o rigidità) vanno ridotte; una maggiore regolarità in resistenza può essere ottenuta rinforzando un numero ridotto di elementi; risultano sempre opportuni interventi volti a migliorare la duttilità locale; infine, l'introduzione di rinforzi locali non deve ridurre la duttilità globale della struttura. La duttilità va intesa come la capacità della struttura a subire deformazioni senza perdere resistenza. E' questo uno degli obiettivi fondamentali della progettazione antisismica, sia del nuovo, sia dell'esistente. Ecco perché si preferisce parlare di "rafforzamento" piuttosto che di "rinforzo": quest'ultimo dà l'idea che si intervenga sulla resistenza, mentre con il termine "rafforzamento" si sottolinea che si rende adeguato il comportamento della costruzione in toto, intervenendo su uno, due o su tutti e tre gli aspetti citati. Un classico criterio di intervento è, ad esempio, quello di aumentare la sola duttilità, lasciando invariata la resistenza. Le strategie di intervento sono quindi di due tipi: selettive, in cui si opera su un numero limitato di elementi strutturali, e globali, in cui si modifica l'impianto strutturale nel suo insieme, ad esempio inserendo nuovi ed ulteriori elementi strutturali, quali pareti o telai. I principi ispiratori delle strategie di intervento selettive sono: eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile: si deve intervenire rinforzando a taglio le travi tozze, i pilastri in corrispondenza dei mezzanini delle scale, i nodi trave-pilastro; eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di piano ("piano soffice"). Molte costruzioni presentano una configurazione a "piano pilotis", con un'elevatissima vulnerabilità nei confronti dei terremoti. Non si deve intervenire sui pilastri del piano pilotis con l'intento di incrementarne la capacità deformativa: ciò porta a collassi rovinosi; aumento della capacità deformativa globale (duttilità) della struttura. Questa, negli edifici in cemento armato, opera sulle cosiddette cerniere plastiche (o, più propriamente, zone dissipative) che sono quelle zone di estremità degli elementi dove si dissipa, attraverso il danneggiamento, l'energia immessa nella costruzione dal terremoto. Sono zone dove le armature trasversali (staffe) giocano un ruolo fondamentale per assicurare un corretto comportamento dissipativo. Questa strategia è conseguibile: incrementando la capacità rotazionale delle potenziali cerniere plastiche, senza variarne la posizione: in tal modo si mantiene l'assetto strutturale esistente, conferendo più capacità deformativa agli elementi che si danneggiano per primi, siano essi travi o pilastri. E' una strategia di minor costo, ma richiede la verifica puntuale del comportamento di ogni elemento in condizioni sismiche; oppure rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze: in tal modo si persegue l'obiettivo di rendere la struttura un meccanismo stabile ad elevata dissipazione di energia, facendo sì che il danno si concentri solo nelle travi e non nei pilastri, che, notoriamente, sono dotati di minore duttilità. E' una strategia di maggior costo, ma richiede solo la verifica a priori del rispetto della gerarchia delle resistenze di cui ricordiamo la definizione: è noto che in ogni elemento strutturale coesistono più meccanismi resistenti. Il caso più semplice e immediato è quello delle travi e dei pilastri, in cui coesistono il meccanismo di taglio e quello di flessione. Ebbene, il primo ha un collasso di tipo fragile, che va evitato in tutti i modi, mentre il secondo si rompe in maniera duttile, quindi va favorito rispetto al primo. Il criterio della gerarchia delle resistenze si applica per far sì che, quando coesistono due meccanismi o elementi resistenti con diversa modalità di collasso, si attivi quello che è più duttile. Questo si applica anche alle travi (duttile), rispetto ai pilastri (meno duttile) ed ai nodi (fragili). L'attuazione del criterio della gerarchia delle resistenze comporta un incremento della resistenza dell'elemento/meccanismo più fragile, progettandolo per resistere alle sollecitazioni massime trasmesse dagli elementi/meccanismi duttile con esso in equilibrio, ed in tal modo non crollerà mai. Le strategie di intervento globali si riferiscono invece alla modifica del comportamento d'insieme della costruzione. In genere, esse implicano interventi di una certa complessità ed invasività, quali ad esempio l'inserimento di nuovi elementi strutturali o la trasformazione di elementi non strutturali, quali le tamponature, in elementi strutturali. In tutti questi casi è bene essere consapevoli che l'equilibrio complessivo della costruzione è alterato, come anche il trasferimento dei carichi al terreno: ognuno degli interventi sopra citato non potrà infatti prescindere da un'attenta verifica dell'impianto di fondazione, che potrebbe divenire a sua volta oggetto di ulteriori, e più pesanti, interventi di rafforzamento.

## Scelte operative: dall'isolamento sismico alla protezione degli elementi non strutturali

Validazione dell'efficacia dell'intervento. La progettazione dell'intervento di rafforzamento deve comprendere le seguenti attività:

- scelta motivata del tipo di intervento;
- scelta delle tecniche e/o dei materiali;
- dimensionamento preliminare dei rinforzi;
- analisi strutturale che tenga conto delle caratteristiche della struttura post-intervento.

Quest'ultimo punto è di particolare importanza: poiché la valutazione della sicurezza pre- e post-intervento è un processo quantitativo, che richiede l'emissione di un giudizio sulla sicurezza basato su dei numeri che provengono dall'analisi della costruzione in condizioni sismiche. Questi numeri sono in genere misure di capacità e misure di domanda. Si osservi come oggi si preferisca parlare di capacità e di domanda, piuttosto che di resistenza e di carichi. Si è infatti detto che la resistenza non è sufficiente, da sola, a descrivere la triade di proprietà che una costruzione deve avere (ancora: rigidità, resistenza, duttilità), mentre la dizione "carichi" esclude dal novero delle domande su una costruzione tutta una serie di azioni che vanno dall'accelerazione imposta dal terremoto, alle varie deformazioni, spostamenti e rotazioni che si presentano in condizioni sismiche. È bene che i professionisti si abituino a definire ogni loro progetto come la realizzazione di un confronto positivo fra capacità e domanda. Per quanto riguarda le tecniche d'intervento che possono essere utilizzate, la scelta di quella più adeguata a ricondurre la costruzione in sicurezza è a carico del professionista. È bene sottolineare che non esiste una soluzione unica per ogni problema, ma un ventaglio di possibili tecniche fra le quali scegliere quella che soddisfa il criterio di massimizzazione di un dato rapporto beneficio/costo. Qui di seguito sono elencate alcune tecniche che possono essere definite, per varie ragioni, "innovative", nel senso che non fanno parte del comune bagaglio di conoscenze del progettista; tuttavia, se adeguatamente approfondite nei loro aspetti teorici e applicativi, possono aiutarlo a risolvere situazioni difficili da affrontare con tecniche tradizionali.



Scarsità di staffe nei pilastri

### Isolamento sismico

La tecnica dell'isolamento sismico come intervento di protezione delle strutture esistenti è stata completamente sdoganata dalla Normativa attuale, che oggi prevede una sezione interamente dedicata ad essa (cfr. NTC-08, § 7.10). Il concetto è molto semplice: si interpone, fra l'elevazione e la fondazione, un insieme di dispositivi che assorbono gli spostamenti indotti dal terremoto, trasferendo all'edificio sovrastante una porzione minima dell'azione sismica. In tal modo, la costruzione viene ad essere completamente protetta e quindi si riesce a perseguire un pieno adeguamento sismico. Si osservi

che, mentre l'obiettivo degli interventi di rafforzamento è di realizzare una costruzione a danneggiamento controllato, nel caso dell'isolamento sismico qualsiasi tipo di danno alle strutture è scongiurato. È, quindi, una tecnica particolarmente indicata per l'edilizia strategica, quali scuole, ospedali, caserme, ecc.

In genere, i costi di questo tipo di intervento sono concorrenziali rispetto a quelli convenzionali se si ha a che fare con edifici di almeno 4 piani. È bene però che il committente, prima di prendere una qualsiasi decisione in merito alla tecnica da adottare, compia una valutazione dei costi che comprenda anche quelli di un eventuale ripristino a seguito di un evento sismico: nel caso dell'isolamento questi sono irrilevanti, mentre nel caso di un intervento di rafforzamento tradizionale essi possono essere anche molto significativi, visto che implicano una dissipazione dell'energia sismica attraverso il danneggiamento degli elementi strutturali. La tecnologia attuale offre diverse soluzioni per i dispositivi di isolamento sismico: sono disponibili sul mercato isolatori di tipo elastomerico, costituiti

da lamine di acciaio vulcanizzate con lamine di gomma, isolatori a pendolo ad attrito, oppure isolatori elastoviscosi. La scelta dell'impiego dell'uno o dell'altro tipo avviene da parte del professionista, in base agli obiettivi che si prefigge in fase di progettazione dell'intervento di adeguamento sismico.

#### FRP

In questi ultimi anni ha preso molto piede la tecnica di rafforzamento mediante materiali compositi, quali fibre di carbonio, di aramide e di vetro, detti comunemente FRP (Fiber Reinforced Polymers). Il documento tecnico emanato dal CNR nel 2005 ha messo un po' d'ordine in un mercato che andava evolvendo in maniera troppo caotica, fissando regole chiare per produttori, applicatori, utilizzatori e controllori. Il pericolo maggiore in questo periodo è la "mancanza di educazione" nell'impiego di questi materiali. Questi presentano infatti caratteristiche meccaniche di assoluto interesse, ma spesso vengono usati in maniera non corretta, dando luogo ad interventi spesso inutili se non addirittura pericolosi. Attualmente, i materiali compositi possono essere usati con una certa confidenza nei rinforzi per confinamento e per taglio, mentre in quelli per flessione bisogna esercitare una certa cautela, poiché il fenomeno della delaminazione, cioè il distacco del materiale dall'elemento rinforzato, è molto pericoloso e necessita di una perizia particolare da parte del progettista per evitarlo, sia attraverso il calcolo sia attraverso l'applicazione di opportuni dettagli costruttivi.

#### CAM

Questa è una tecnica che sta avendo una notevole diffusione dopo il terremoto dell'Aquila, ma che in realtà è presente sul mercato da più di un decennio. Si tratta in sostanza di una metodologia di rafforzamento locale e diffuso degli elementi strutturali, sia in cemento armato, che in muratura, basata sull'applicazione di nastri di acciaio inossidabile pretesi, che vengono avvolti attorno ed attraverso l'elemento da rinforzare per essere poi bloccati meccanicamente. Ne scaturisce un efficacissimo reticolo tridimensionale in grado di compattare con una coazione triassiale e di conferire anche ottime caratteristiche di resistenza a trazione. Un aspetto molto interessante riguarda l'applicazione della pretensione nei nastri, che consente di renderli attivi, ovvero immediatamente collaboranti, senza dover necessariamente attendere che l'elemento strutturale si deformi, limitandone quindi significativamente il danneggiamento. L'acronimo CAM sta infatti per Confinamento Attivo dei Manufatti. La tecnica è estremamente valida e consigliabile per il rinforzo dei meccanismi fragili, ma soprattutto dei nodi trave-pilastro delle strutture in cemento armato, dove è possibile letteralmente "impacchettare" il nodo per prevenirne la rottura in condizioni sismiche e comunque per incrementarne la duttilità. Analogamente, è usata nelle strutture in muratura per riammorsare pareti in adiacenza, per migliorare il collegamento fra pareti e solai, per confinare le singole pareti, incrementandone la resistenza. L'esiguo spessore dei nastri (inferiore al millimetro) consente un'agevole "cucitura" del rinforzo su qualsiasi geometria e riduce al massimo l'invasività dell'intervento poiché le dimensioni degli elementi rinforzati non variano e, una volta riapplicata l'intonacatura, l'intervento non è più visibile. Riguardo al comportamento sismico, va notato infine che si riesce ad ottenere un significativo miglioramento strutturale con un incremento di masse praticamente nullo.

#### Protezione degli elementi non strutturali

Nelle Normative più avanzate si sta iniziando a sollevare la questione della protezione degli elementi non strutturali, quali le tamponature. In molti terremoti del recente passato si è assistito a collassi sensazionali di elementi di tamponatura che, letteralmente esplodendo verso l'esterno, hanno messo a repentaglio la vita delle persone che cercavano scampo all'aperto. È noto che le tamponature non sono soggette a calcolo. Il professionista sensibile sa però che, durante un terremoto, la tamponatura esterna di un edificio gioca un doppio ruolo: interagisce col telaio strutturale resistente ed è soggetta ad azioni che tendono a farla ribaltare verso l'esterno. Il primo effetto lo si vede nel piano della tamponatura: il terremoto produce le caratteristiche lesioni "ad X" e non è raro vedere che gli stessi elementi strutturali, quali i pilastri, sono a loro volta danneggiati dall'interazione con la tamponatura. Il secondo effetto lo si vede nei riquadri di tamponatura che sono espulsi verso l'esterno. Il progettista che voglia prevenire questi fenomeni indesiderati, dovrebbe avere a disposizione un sistema di tamponatura che sia sufficientemente flessibile nel piano, sì da evitare le suddette dannose interazioni con travi e pilastri, ma al tempo stesso presenti una resistenza nei confronti delle azioni perpendicolari al suo piano, sì da evitare il pericolo di ribaltamento.