ASSOCIAZIONE NAZIONALE ITALIANA DI INGEGNERIA SISMICA
ANIDIS
Italian National Association of Earthquake Engineering

12° Convegno Nazionale "L'Ingegneria sismica in Italia", Pisa 10-14 Giugno 2007

Analisi della qualità della ricostruzione dopo il sisma del 1997 in Umbria

A. De Sortis
Dipartimento della Protezione Civile, Ufficio Rischio Sismico, Roma, Italia

U. Nasini, E. Aisa, A. Gravina
Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile, Provincia di Perugia, Italia

Keywords: Miglioramento e adeguamento sismico delle costruzioni

ABSTRACT:

La descrizione di una procedura elaborata dalla Provincia di Perugia per eseguire controlli di tipo qualitativo e quantitativo su un campione di edifici oggetto di interventi di ripristino dopo il sisma del 1997 in Umbria è riportata in una memoria presentata al precedente Convegno nazionale (De Sortis *et al.*, 2004a). La procedura ha preso l'avvio dalla elaborazione di alcune schede di rilevamento del giudizio del tecnico istruttore della Provincia, deputato al controllo. Parallelamente allo sviluppo della scheda si è esplorata la possibilità di impiantare un sistema esperto a supporto del giudizio sulla qualità, basato sulla matematica degli insiemi sfuocati. Il sistema esperto parte dalle valutazioni dei rilevatori riportati nelle schede ed è di ausilio all'emissione del giudizio di qualità sul progetto, sugli interventi, sul rapporto benefici/costi e sul recupero del valore storico-architettonico. Combinando i giudizi parziali è, infine, possibile, valutare l'operazione nel suo complesso.

Una prima analisi dei risultati era stata riportata in (De Sortis *et al.*, 2004b), con elaborazioni basate su di un primo limitato campione di schede. A distanza di diversi anni il campione si è notevolmente arricchito e consta ora di 1509 schede sul progetto, 1553 schede sugli interventi, 166 schede sul rapporto benefici/costi e 1510 schede sul recupero del valore storico-architettonico. L'elaborazione di questa base di dati, sintetizzata in questa memoria, consente di trarre spunti molto interessanti, sia di carattere prettamente strutturale, costruttivo e storico-architettonico, sia di carattere normativo sulla capacità di incidere sulla realtà di un territorio molto vasto nel settore della riparazione del danno e della riduzione del rischio sismico.

1 INTRODUZIONE

Il presente lavoro si inquadra in una attività istituzionale che ha visto la collaborazione delle Province di Perugia e Terni e della Regione Umbria sul tema del controllo della qualità della ricostruzione dopo il sisma del settembre 1997. A quasi 10 anni dall'evento calamitoso, i dati raccolti possono ormai considerarsi definitivi, pertanto l'analisi condotta vuole essere una fotografia dello stato dell'arte in Umbria in merito agli interventi eseguiti sulle costruzioni danneggiate di importanza ordinaria.

I dettagli sull'attività di controllo svolta dalle Province e sulle procedure sono riportati in (De Sortis *et al.*, 2004a e 2004b). A quell'epoca erano disponibili i dati raccolti dal 01/08/2001 al 30/06/03. Nel presente lavoro si aggiornano le considerazioni esposte nella precedente memoria sulla base di una nuova analisi dei dati raccolti fino al 31/12/2006.

Il campione esaminato è composto di 1339 edifici esistenti ordinari in muratura, sottoposti ad interventi di miglioramento o adeguamento sismico, i cui progetti di ripristino strutturale sono stati oggetto di controllo da parte dei Tecnici Istruttori del Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile della Provincia di Perugia.

Questo tipo di controllo si effettua su un campione del 20% dei progetti depositati presso gli Uffici della Provincia, secondo la D.G.R. n. 698/01. Il controllo è di tipo quantitativo e qualitativo e viene svolto sia in fase di progettazione che in corso d'opera. Inoltre, al termine dei lavori, viene valutato anche il rapporto tra i costi sostenuti ed i benefici ottenuti in relazione al finanziamento erogato dallo Stato.

I dati raccolti nell'attività di controllo comprendono, in realtà, anche edifici esistenti in c.a. ed edifici che vengono demoliti e ricostruiti; la tipologia scelta per condurre l'analisi, muratura ordinaria, è però la più frequente nel territorio della Provincia e, quindi, quella su cui si sono svolti la maggior parte degli interventi post-sisma a finanziamento pubblico.

Gli interventi si riferiscono, in ogni caso, ad edifici privati; pertanto, sono escluse dal campione le opere pubbliche, che seguono altre procedure di finanziamento.

2 QUALITA' DEL PROGETTO

2.1 *Dati generali*

Le tipologie costruttive degli edifici controllati sono riportati in Tabella 1:

Tabella 1. Tipologie costruttive

	ORIGINARIE		PROGETTO	
	n	%	n	%
Muratura ordinaria	1479	98	1367	91
Muratura armata	0	0	11	1
Cemento armato	26	2	123	8
Acciaio	1	0	2	0
Prefabbricato	3	0	6	0
TOTALE	1509	100	1509	100

La tipologia costruttiva prevalente degli edifici esistenti è, dunque, la muratura con il 98% (1479) dei casi esaminati; la percentuale scende all'89% (1339) nello stato di progetto, a causa di alcune demolizioni e ricostruzioni con tipologie diverse.

Una piccola percentuale (12%) di queste costruzioni è sottoposto a vincolo di legge per i beni culturali e ambientali ai sensi del D.L. n. 490/99 e alle limitazioni imposte nelle zone in frana ai sensi del D.P.R. n. 380/99 (Tabella 2) .

Tabella 2. Edifici sottoposti a vincoli di legge

NORMA	n	%
D.L. n. 490/99	164	11
Art 61del D.P.R. 380/01	9	1
TOTALE	173	12

Il sottoinsieme su cui viene effettivamente svolta l'analisi dei dati (1301 costruzioni, pari all'88% del totale degli edifici esistenti in muratura) è quello degli interventi di consolidamento attraverso opere inquadrabili normativamente come miglioramento o adeguamento sismico (Tabella 3). Con la ricostruzione in Umbria l'approccio di miglioramento sismico ha comportato interventi generalizzati obbligatori (interventi minimi) su tutti gli elementi strutturali verticali ed orizzontali, imponendo anche una soglia minima di resistenza da raggiungere (65% dell'adeguamento).

Per quanto concerne le attività di controllo della Provincia, da notare che solo il 7% dei progetti è stato approvato senza varianti o integrazioni (Tabella 4). In realtà, le richieste di integrazione non implicano variazioni sostanziali degli interventi strutturali, ma sono, nella maggior parte dei casi, chiarimenti riguardanti i vari aspetti del progetto (ad esempio, esaustività degli elaborati grafici, dettagli riguardanti i particolari costruttivi, specifiche sulle verifiche strutturali). Questo dato è leggermente migliorato rispetto alle elaborazioni condotte nel 2004, passando dal 96% al 93%.

Tabella 3. Interventi su edifici esistenti in muratura

	n	%
Miglioramento	1148	78
Adeguamento	153	10
Nuova costruzione	178	12
TOTALE	1479	100

Tabella 4. Progetti oggetto di integrazioni e/o varianti

	n	%
Progetti originali	1509	100
Progetti oggetto di richiesta di integrazione	1404	93

Sugli interventi in esame ha avuto un notevole impatto la campagna di microzonazione sismica speditiva, che ha condotto ad avere il 57% dei progetti con un fattore di amplificazione sismica Fa compreso tra 1,2 e 1,5 (Tabella 5). Il coefficiente Fa tiene conto degli effetti di amplificazione locale del moto sismico, incrementando le azioni di verifica. La Tabella 5 riassume i dati estrapolati solo dai progetti in cui la valutazione di Fa risulta corretta.

Tabella 5. Fattore di amplificazione sismica

	n	%
Fa = 1; 1.1	383	35
Fa = 1.2; 1.3	474	44
Fa = 1.4; 1.5	145	13
Fa = 1.6; 1.7	47	4
Fa = 1.8; 1.9	1	0
Fa = 2	29	3
TOTALE	1079	100

Tabella 6. Carenze strutturali

(possibilità di scelta multipla)	n	%
carenza di resistenza della muratura	1076	83
murature portanti in falso	50	4
irregolarità di geometria in pianta	91	7
irregolarità maglia muraria in elevazione	93	7
coperture prive di collegamento trasversale	1118	86
carenze non segnalate	12	1

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i dati relativi allo stato di danneggiamento dell'edificio, che, insieme con la sua vulnerabilità (D.G.R. n. 5180/98) concorre a definire il livello di costo e, quindi, il contributo concedibile. Nei casi esaminati, le carenze strutturali maggiormente segnalate sono la scarsa qualità della muratura (83% e la mancanza di collegamenti in copertura (86%).

Inoltre, l'altro dato rilevante è che la maggior parte degli edifici presenta uno stato di danno significativo (48%, Tabella 8) e una vulnerabilità alta (48%, Tabella 7); la combinazione di questi due parametri fa sì che la maggior parte dei livelli di costo si attesti su L3 (42%, Tabella 9), cioè sul valore intermedio del contributo erogabile.

Da un confronto con i dati del 2004 emerge che sono in notevole aumento gli edifici con un danno significativo (erano il 39%), a discapito del danno

gravissimo (erano il 31%): questo perché, nel corso di questi 3 anni, sono state finanziate soprattutto le costruzioni in zone meno colpite dall'eventi sismico del 1997.

Tabella 7. Livelli di vulnerabilità

	n	%
bassa	254	20
media 1	361	28
media 2	60	5
alta	623	48
non calcolata	3	0
TOTALE	1301	100

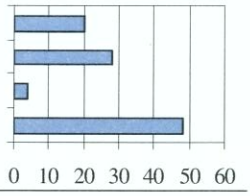


Tabella 8. Livelli di danno

	n	%
danno significativo	622	48
danno grave	320	25
danno gravissimo	285	22
Crollo	74	5
TOTALE	1301	100

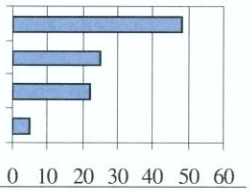
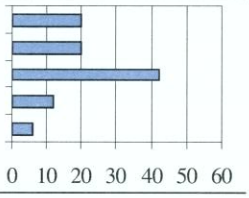


Tabella 9. Livelli di costo

	n	%
L1	255	20
L2	262	20
L3	552	42
L4	155	12
L5	77	6
TOTALE	1301	100



2.2 *Valutazione dell'incremento di sicurezza*

Passando ora all'analisi dei risultati delle verifiche sismiche, nell'insieme già individuato vengono selezionati solo gli edifici il cui calcolo risulta svolto in modo corretto nell'ultima versione del progetto depositata (994 edifici, pari al 76% del campione).

Poiché si tratta di edifici esistenti in muratura, i coefficienti sismici adottati nelle verifiche, ai sensi del D.M. 16/09/1996, sono: $\beta = 4$, $R = 1$; in tutti i casi esaminati risulta poi $I = 1$. Inoltre, tenendo conto che la D.G.R. n. 5180/98 prescrive di raggiungere, nelle zone di II Categoria, almeno un coefficiente di intensità sismica pari al 65% di quello per gli interventi di adeguamento, il valore di riferimento del coefficiente di intensità sismica diventa pertanto $C = 0.07 \times 0{,}65 = 0{,}0455$. Per quanto riguarda l'interazione terreno - struttura, il fattore di amplificazione sismica Fa, introdotto sulla base degli studi di microzonazione sismica speditiva, sostituisce il fattore ε della normativa nazionale e può essere determinante ai fini della verifica poiché varia nell'intervallo 1 – 2 (Tabella 5).

Le curve di distribuzione di frequenza nelle figure seguenti riportano l'andamento della resistenza espressa in termini di coefficiente sismico per i seguenti meccanismi di collasso:

- rottura per azioni nel piano della muratura (C_1, Figura 1);
- rottura per azioni fuori dal piano della muratura (C_2, Figura 2);
- crisi dei collegamenti maschi murari – orizzontamenti o crisi dei dispositivi di vincolo quali catene o cordoli (C_3, Figura 3).

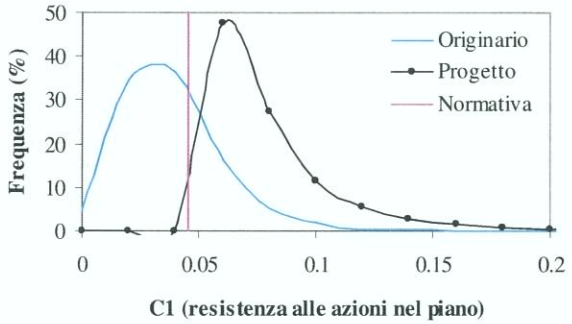


Figura 1. Resistenza sismica per azioni nel piano ($C_1 = F_1 / \beta R I Fa W$) espressa in termini di coefficiente sismico

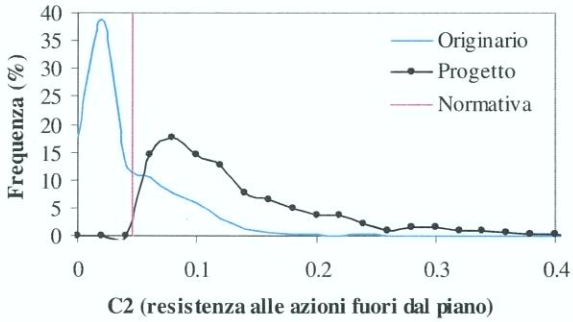


Figura 2. Resistenza sismica per azioni fuori dal piano ($C_2 = F_2 / \beta W$) espressa in termini di coefficiente sismico

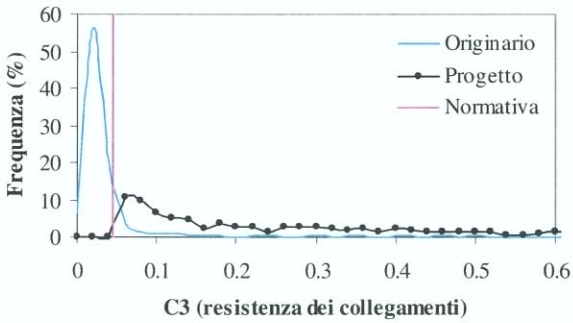


Figura 3. Resistenza sismica dei collegamenti ($C_3 = F_3 / \beta W$) espressa in termini di coefficiente sismico

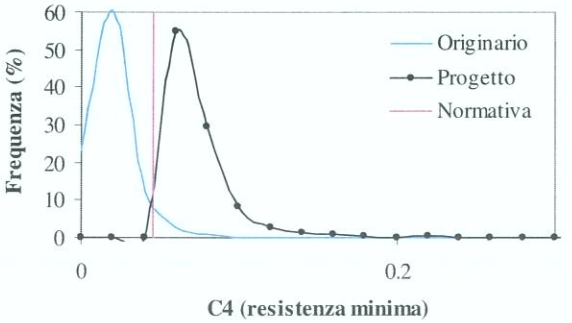


Figura 4. Resistenza sismica minima espressa in termini di coefficiente sismico ($C_4 = \min(C_1, C_2, C_3)$)

La resistenza globale è data dal minimo tra i singoli coefficienti prima elencati (C_4, Figura 4).

Dai grafici si evidenzia come il salto di resistenza nel passaggio dallo stato originario allo stato di progetto è minore nel caso di rottura a taglio (Figura 1), mentre per gli altri due meccanismi è maggiore e con valori più dispersi. E' interessante notare dal grafico di Figura 3 come nello stato originario il collasso sia dovuto a crisi dei collegamenti (confrontare Figura 3 e Figura 4), mentre nello stato di progetto il collasso sia dovuto ad azioni nel piano (confrontare Figura 1 e Figura 4).

2.3 *Valutazione degli elaborati progettuali*

Il percorso di valutazione della qualità del progetto si sviluppa in due sezioni:

- rispetto delle normative nazionali sulle costruzioni, aspetti geologico-geotecnici, modellazione della struttura, verifiche statiche e sismiche;
- adempimenti previsti nella normativa sulla ricostruzione (D.G.R. n. 5180/98).

Le valutazioni vengono espresse dai Tecnici Istruttori della Provincia con un punteggio compreso tra 0 e 10. Nell'assegnare un voto ad ogni aspetto del progetto, il giudizio viene sospeso in mancanza di elaborati che esplichino la volontà del tecnico progettista, cioè viene valutato solo ciò che è esplicitamente definito; questo implica che il giudizio globale può essere positivo ma espressa, in effetti, solo su alcune parti della documentazione presentata (giudizi parziali).

L'analisi dei risultati viene condotta su due versioni del medesimo progetto:

- l'originaria (individuata dalla sigla "PO"), depositata presso gli Uffici della Provincia di Perugia;
- l'ultima versione (individuata dalla sigla "UP"), non sempre definitiva, frutto di integrazioni e/o varianti e, dunque, già revisionata dai Tecnici Istruttori.

La percentuale di modifiche che compare nelle tabelle seguenti è relativa a tutti quelle voci che sono state oggetto di correzione.

La Figura 5 rappresenta l'andamento delle valutazioni riguardo il rispetto della normativa antisismica (D.M. 16/01/96): nell'ambito di questo controllo, la problematica più ricorrente riguarda il calcolo dell'edificio (36% nel PO e 7% nell'UP), così come emergeva anche nelle elaborazioni del 2004. Si nota però una diminuzione delle modifiche richieste già nel PO.

La Figura 6 riporta l'andamento delle valutazioni relative agli elementi in c.a., acciaio e prefabbricato presenti nelle strutture in muratura (ad esempio, scale); qui le modifiche vengono richieste in prevalenza nell'ambito del corretto dimensionamento dei solai (30% nel PO e 15% nell'UP). Anche in questo caso si nota un miglioramento rispetto alle precedenti elaborazioni, confinato nell'ambito della completezza formale degli elaborati presentati.

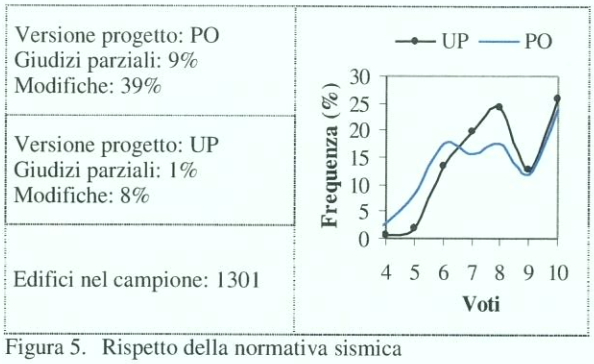


Figura 5. Rispetto della normativa sismica

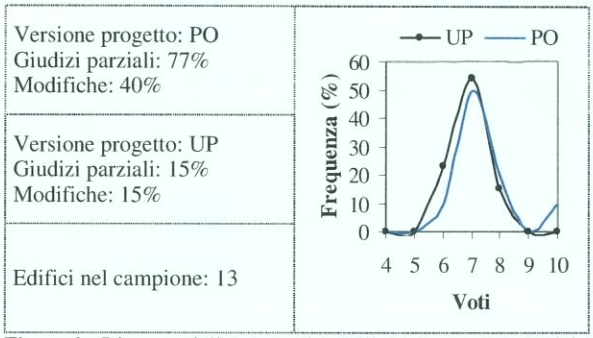


Figura 6. Rispetto della normativa sulle nuove costruzioni in c.a., acciaio e prefabbricate

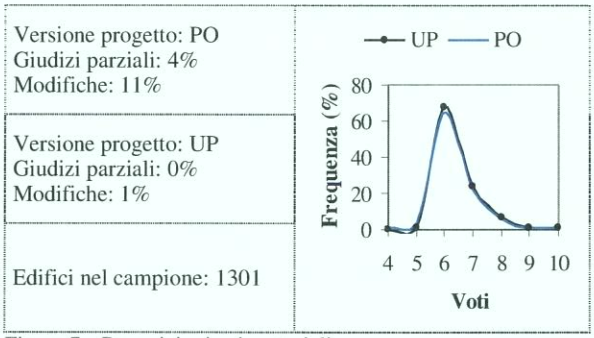


Figura 7. Prescrizioni sui materiali

Nella previsione progettuale delle specifiche dei materiali utilizzati (Figura 7), si riscontra una scarsa attenzione (7% nel PO) alla definizione delle caratteristiche del legno scelto per la realizzazione di nuovi orizzontamenti e coperture. La tendenza al miglioramento si continua a notare pure in quest'ambito. I materiali da utilizzare nell'intervento sono spesso individuati attraverso le voci del Computo Metrico Estimativo; diversa sarà, come vedremo, la situazione in cantiere, dove il rispetto della qualità sarà molto meno controllato.

Un dato interessante da sottolineare è l'alto numero di modifiche richieste relative allo studio dell'interazione terreno–struttura (Figura 8), nonostante l'attenzione posta al problema attraverso la vasta campagna conoscitiva della microzonazione condotta sul territorio della provincia. La problema-

tica più ricorrente in questo campo è la coerenza tra gli elaborati progettuali e la Relazione Geologico-geotecnica nelle prescrizioni progettuali relative al piano fondale (31% nel PO e 8% nell'UP). In modo particolare risultano spesso non pienamente risolte le problematiche di intervento relative ai cedimenti fondali. Tale danno, legato al terremoto, è risultato presente in un elevato numero di progetti ma non sempre motivato da adeguati studi geotecnici. L'esperienza acquisita negli anni di ricostruzione ha, però, migliorato l'attenzione dei Progettisti nei confronti di questo aspetto.

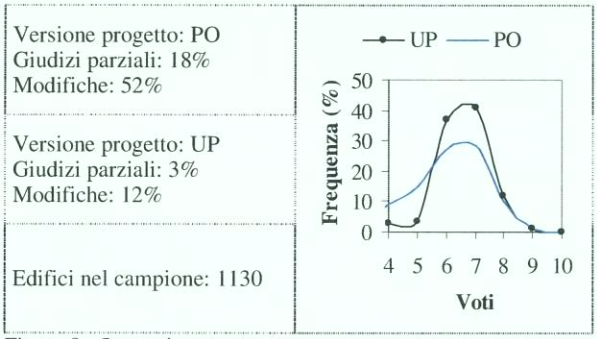


Figura 8. Interazione terreno-struttura

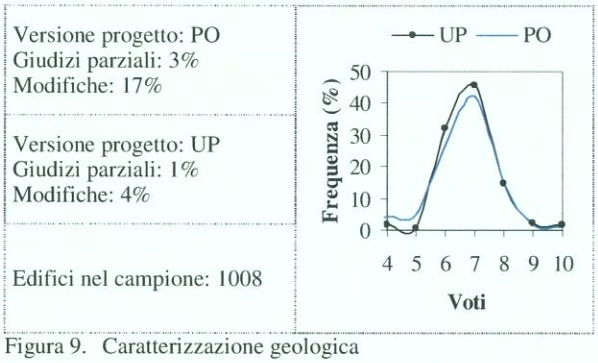


Figura 9. Caratterizzazione geologica

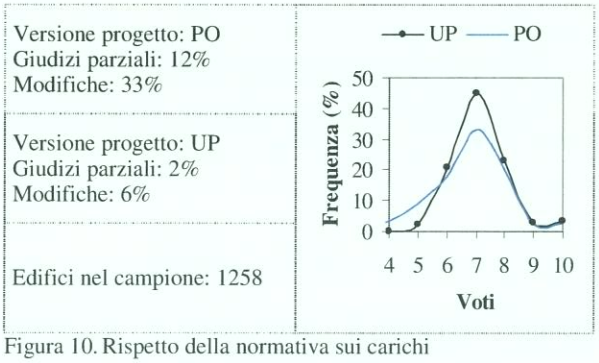


Figura 10. Rispetto della normativa sui carichi

Le relazioni geologiche, inoltre, (Figura 9) risultano spesso carenti degli elaborati grafici esplicativi delle prove in situ (13% nel PO e 4% nell'UP), anche se in maniera minore rispetto al 2004.

Per quanto concerne i carichi (Figura 10), le inesattezze più frequenti riguardano la valutazione dei pesi propri degli elementi (28% nel PO e 5% nell'UP). Nel complesso, però, i dati sono migliori rispetto alle precedenti elaborazioni.

La Figura 11 evidenzia uno degli aspetti più problematici, cioè le verifiche strutturali, soprattutto nell'ambito della corretta modellazione delle strutture e nella coerenza con il progetto architettonico (42% nel PO e 8% nell'UP). In questo caso, al contrario degli altri aspetti progettuali, si ha un peggioramento dei risultati, sia nel PO che nell'UP, rispetto ai dati esaminati nel 2004. Le modifiche richieste spesso sono determinate dalla non corretta individuazione, all'interno di complessi edilizi, dell'organismo strutturale resistente all'azione sismica, sulla base della definizione di "edificio" dell'Allegato A delle D.G.R. n. 5180/98.

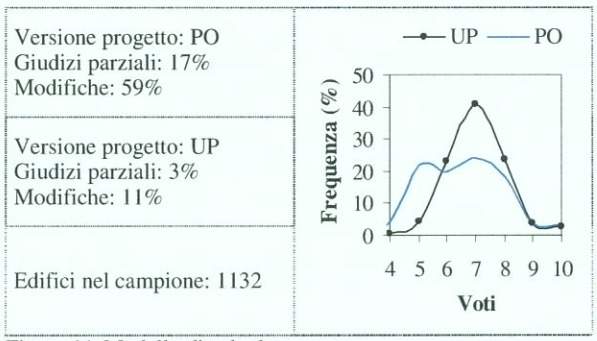


Figura 11. Modello di calcolo

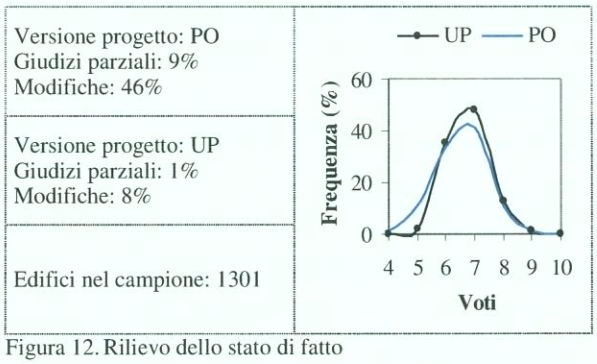


Figura 12. Rilievo dello stato di fatto

Nel rilievo dello stato di fatto (Figura 12) risulta spesso non sufficiente l'approfondimento della conoscenza della struttura attraverso un'adeguata campagna di saggi (26% nel PO e 11% nell'UP). Il risultato del PO è sostanzialmente in linea con i dati precedenti, mentre risulta migliorato l'UP.

Negli elaborati di progetto, invece, la parte più carente risulta sempre quella dei particolari costruttivi (Figura 13) e delle verifiche (70% nel PO e 13% nell'UP): ciò determina il grande numero di richieste di integrazione. Il dato relativo al PO risulta notevolmente migliorato (12% in meno di giudizi parziali e 13% in meno di modifiche richieste), così come l'UP.

Nel caso dell'eliminazione delle carenze strutturali e degli interventi minimi[1], essendo due condi-

[1] Vedi Appendice

zioni obbligatorie da normativa, non è invece possibile sospendere il giudizio. Si noti, anche in questo caso, l'alto numero di richieste di modifiche. Per quanto riguarda i rimedi contro le carenze strutturali (Figura 14), scarsa attenzione è riservata di solito al miglioramento della qualità dei materiali (13% nel PO e 3% nell'UP); ciò è determinato dall'ambiguità normativa che, pur inserendo la cattiva qualità muraria tra le carenze da segnalare ed eliminare con opportune opere di consolidamento, privilegia, con coefficienti maggiorativi del contributo, gli interventi conservativi delle apparecchiature murarie.

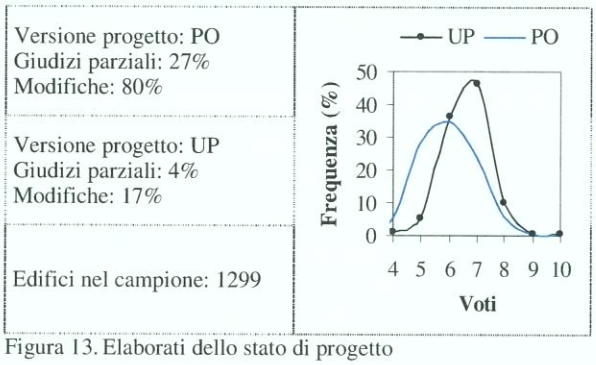


Figura 13. Elaborati dello stato di progetto

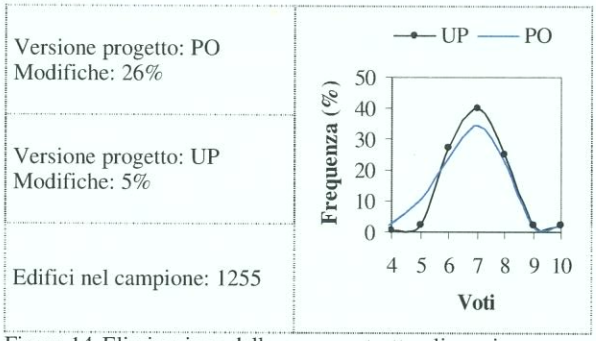


Figura 14. Eliminazione delle carenze strutturali gravi

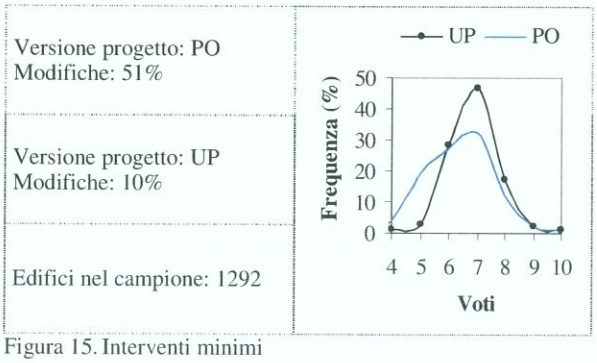


Figura 15. Interventi minimi

Nel caso degli interventi minimi (Figura 15), invece, in molti casi rimangono non sufficientemente efficaci i collegamenti degli orizzontamenti alle murature d'ambito (39% nel PO e 7% nell'UP). La forte diminuzione delle modifiche denota un intervento della Provincia estremamente soddisfacente in termini di efficacia di tali collegamenti, voce rilevante tra gli interventi minimi. In entrambi gli aspetti si continua, comunque, a migliorare rispetto al 2004.

2.4 *Valutazione del progetto attraverso un sistema esperto*

Le valutazioni date alle singole voci dai Tecnici Istruttori sono state elaborate con il Sistema Esperto descritto in (De Sortis *et al.*, 2004a), in modo da pervenire ad un giudizio globale della qualità del progetto. La distribuzione delle valutazioni è riportata in Figura 16.

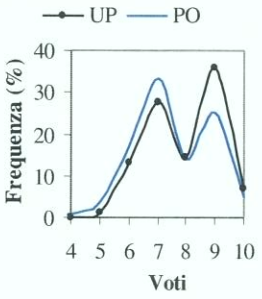


Figura 16. Distribuzione delle valutazioni del Sistema Esperto

In Figura 17 (a) e (b) e sono riportati i voti dei singoli edifici ed il loro valore medio: si può notare che tali valori sono contenuti in una fascia delimitata dal voto 5 e dal voto 9, con una minore dispersione nel caso dell'ultima versione del progetto (UP).

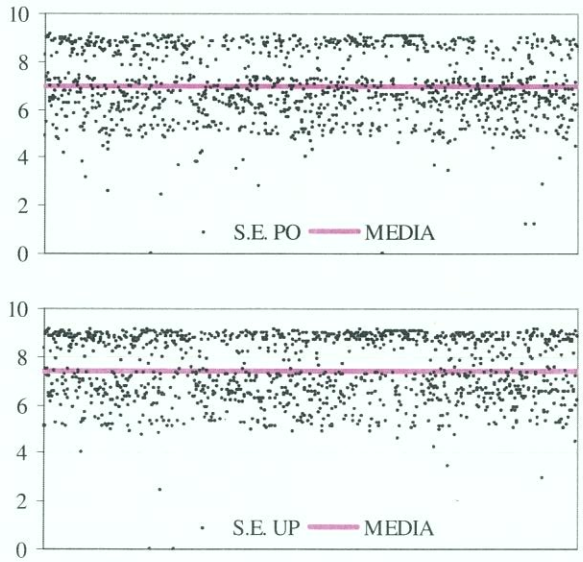


Figura 17. Valutazione del Sistema Esperto (a) nel "Progetto Originale" e (b) nel "Ultimo Protocollo"

3 CONSERVAZIONE ARCHITETTONICA

Per studiare anche quanto gli interventi post-sisma modifichino i caratteri originari degli edifici, in collaborazione con la Soprintendenza per i BB.AA.P.P.S.A.D. dell'Umbria, sono state individuate alcune voci di valutazione sulla conservazione architettonica dell'opera, sia nel progetto che in can-

tiere. La maggior parte delle costruzioni presenta una tipologia vicina ai caratteri tradizionali (Figura 18) e non ha subito sostanziali modifiche nel corso degli anni.

Il giudizio, soddisfacente in fase di progetto, tende a peggiorare lievemente in cantiere (Figura 19). Una valutazione specialistica di questi aspetti, comunque, è al di fuori degli obbiettivi dello studio.

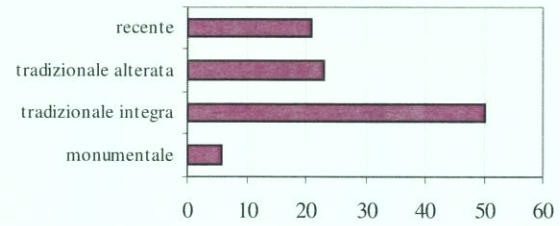


Figura 18. Tipologie architettoniche originarie

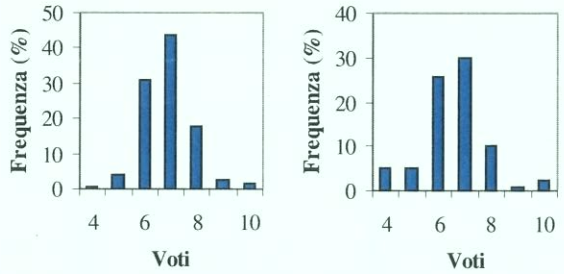


Figura 19. Conservazione architettonica (a) nel Progetto e (b) nel Cantiere

4 QUALITA' DEGLI INTERVENTI

I sopralluoghi nel campione sono 1286, effettuati su 252 edifici di cui, fino al 31/12/06, è stato comunicato l'inizio dei lavori. Il controllo si svolge sulla qualità esecutiva di una serie di interventi significativi per il consolidamento di strutture murarie esistenti.

4.1 *Aspetti generali del cantiere*

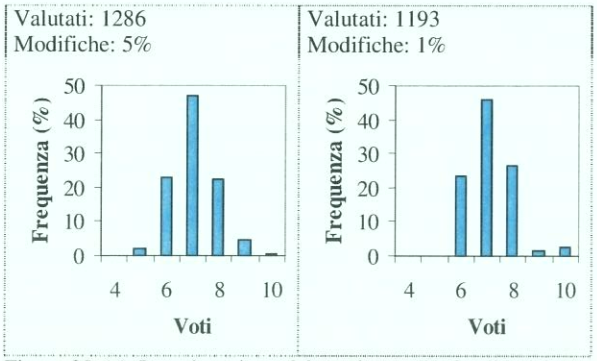


Figura 20. (a) Organizzazione del cantiere – (b) Qualità dei materiali

L'organizzazione del cantiere (Figura 20a) risulta principalmente carente nello stato dei ponteggi, mentre per quanto riguarda i materiali utilizzati negli interventi (Figura 20b), modifiche non sono richieste grazie alla presenza in cantiere di certificazioni che ne attestano le caratteristiche meccaniche. La percentuale di modifiche richieste è indice di interventi non realizzati seguendo pienamente le regole della normativa e del buon costruire.

4.2 *Gli interventi osservati*

Di seguito vengono analizzate alcune delle tipologie di interventi frequenti nel campione osservato. Le modifiche segnalate riguardano quei singoli aspetti delle lavorazioni esaminate che vengono maggiormente disattesi.

Nell'intervento di iniezioni di miscele leganti (Figura 21a) nella maggior parte dei casi esaminati non viene eseguita la prova di iniettabilità delle murature prima dell'intervento stesso (26%).

L'intervento di rinzaffo strutturale (Figura 21b) presenta ancora un campione ancora esiguo; tuttavia si evidenzia una scarsa attenzione alla scarnitura dei giunti murari (7%)

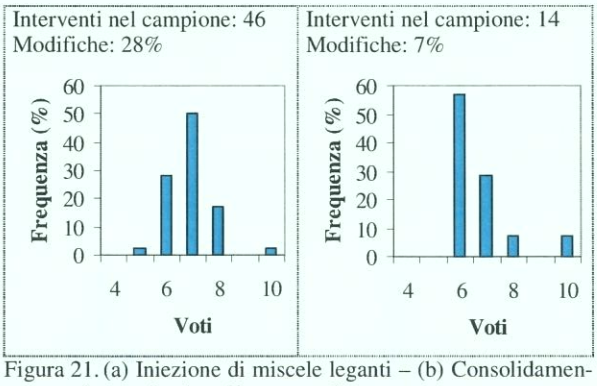


Figura 21. (a) Iniezione di miscele leganti – (b) Consolidamento murario tramite rinzaffo strutturale

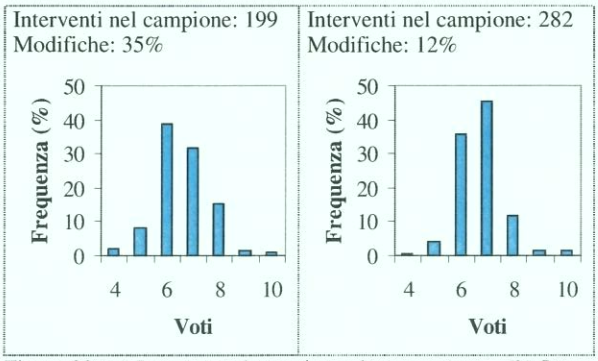


Figura 22. (a) Intonaco o betoncino o lastra armata – (b) Interventi tradizionali (scuci-cuci, ispessimenti murari)

Nell'intervento di intonaco armato (Figura 22a) l'aspetto più problematico è la mancata continuità della rete elettrosaldata sul paramento murario oggetto di consolidamento, da effettuarsi tramite sovrapposizioni opportune o ferri aggiuntivi (20%).

Nell'ambito degli interventi tradizionali su murature esistenti, (ad esempio lo scuci-cuci, Figura 22b),

l'aspetto su cui vengono richieste più modifiche è l'ammorsatura tra i blocchi esistenti e i nuovi elementi in laterizio, soprattutto nel piano della muratura (5%).

Nell'intervento in fondazione (Figura 23a), inteso sia come cordoli di sottofondazione che come nuove fondazioni, la carenza maggiormente riscontrata è l'interasse dei collegamenti alla struttura esistente (3%).

Nell'intervento di consolidamento di archi e volte (Figura 23a) la problematica più importante è il collegamento della cappa in c.a. alla struttura voltata e alle murature d'ambito (6%).

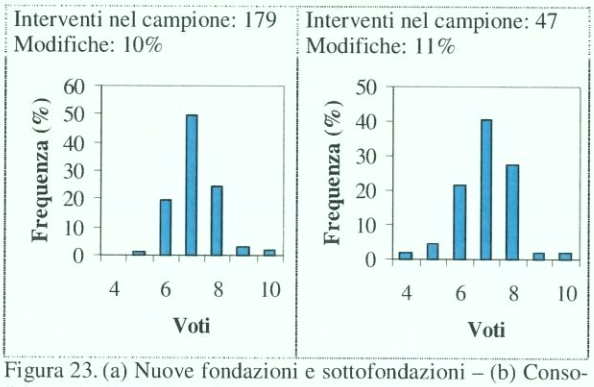


Figura 23. (a) Nuove fondazioni e sottofondazioni – (b) Consolidamento di archi e volte

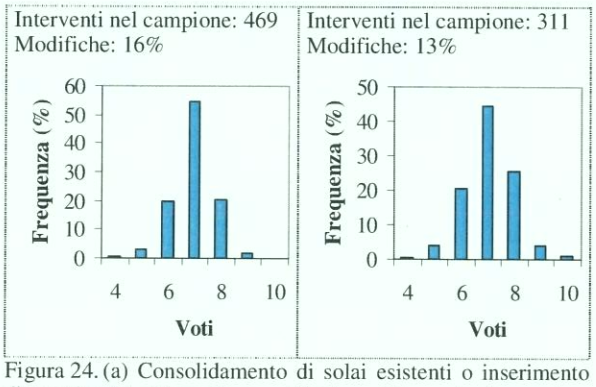


Figura 24. (a) Consolidamento di solai esistenti o inserimento di nuovi solai di interpiano – (b) Consolidamento di coperture esistenti o inserimento di nuove coperture

Negli interventi di sostituzione e di consolidamento di orizzontamenti, sia di piano (Figura 24a), che di copertura (Figura 24b), si riscontra una scarsa attenzione al collegamento degli elementi costituenti l'impalcato (orditure principali e secondare e solette armate) alle murature d'ambito (4% nei solai e 6% nelle coperture), aspetto peraltro fondamentale nell'efficacia dell'intervento.

Nel caso di inserimento di nuovi setti (Figura 25a) la problematica più importante è l'efficacia del collegamento tra nuovi elementi e la struttura esistente (5%).

L'aspetto più critico degli incatenamenti (Figura 25b) è l'alloggiamento della piastra di ancoraggio nella muratura (4%).

Nelle cordolature, sia in c.a. (Figura 26a) che in acciaio (Figura 26b), scarsa importanza è di solito data all'irrigidimento degli angoli (13% nei cordoli in c.a. e 4% nei cordoli in acciaio): anche in questo caso, questi dettagli costruttivi, se non curati adeguatamente, possono compromettere il buon funzionamento delle cordolature.

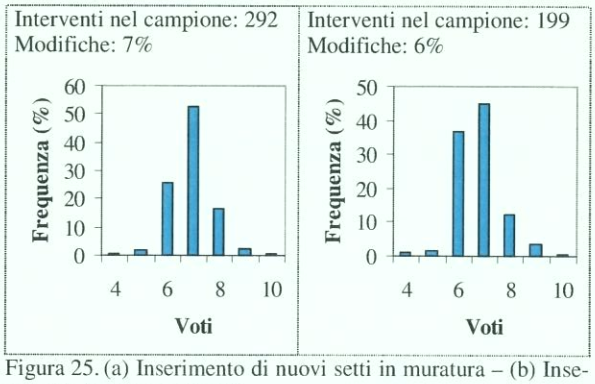


Figura 25. (a) Inserimento di nuovi setti in muratura – (b) Inserimento di catene e tiranti

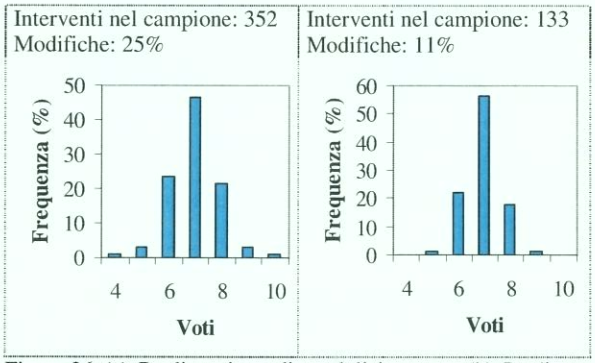


Figura 26. (a) Realizzazione di cordoli in c.a. – (b) Realizzazione di cordoli in acciaio

L' inserimento di catene e di cordolature, sia in c.a. che in acciaio, unitamente al consolidamento o rifacimento di solai e coperture, costituiscono gli interventi maggiormente realizzati nei sopralluoghi effettuati. Rientrando nel pacchetto degli interventi minimi, la loro buona qualità ne conferma l'efficacia normativa.

4.3 *Valutazione globale del cantiere*

Anche per il Cantiere viene valutata una qualità globale di ogni sopralluogo (Figura 27). L'osservazione della distribuzione delle valutazioni ha suggerito di stimare questo indicatore globale attraverso una media pesata (con pesi "crisp") delle valutazioni singole, espresse attraverso "fuzzy set". Allo scopo è stato direttamente applicato il Principio di Estensione (Zadeh, 1975). Per le valutazioni finali sono stati condotti alcuni tentativi, variando i pesi e le funzioni di appartenenza dei "fuzzy set", in modo da rispecchiare, su di un sottoinsieme opportunamente scelto, il giudizio esperto dei rilevatori. Le defuzzyficazione, necessaria a rappresentare agevol-

mente con un valore "crisp" la valutazione sintetica sulle qualità del cantiere, è stata condotta in via prudenziale prendendo il limite inferiore dell'intervallo di variazione del "fuzzy set" media pesata.

Esaminando la distribuzione dei voti relativi ai sopralluoghi (Figura 28) si nota una minore dispersione rispetto alle valutazioni effettuate sul Progetto ed una sostanziale sufficienza.

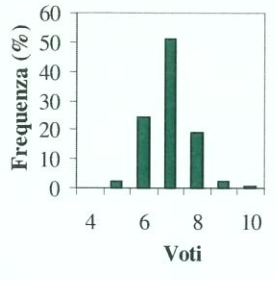


Figura 27. Indicatore globale della qualità degli interventi

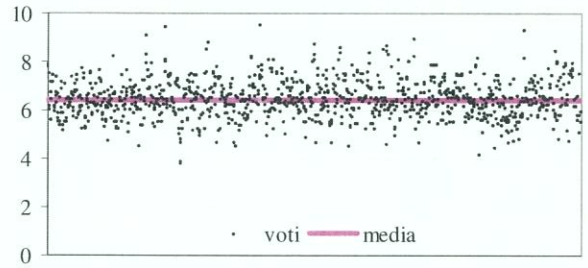


Figura 28. Valutazioni globali del campione "Cantiere"

5 ANALISI DEI COSTI DEGLI INTERVENTI

Le valutazioni inerenti i costi sostenuti e i rapporti benefici/costi degli interventi vengono effettuate prescindendo da un giudizio qualitativo su di essi, ottenuto, invece, dall'analisi del progetto e dell'intervento. Le elaborazioni si riferiscono ad un campione di 166 edifici, su un totale di 1509 progetti esaminati; solo per il 14,4%, quindi, l'iter della "ricostruzione" risulta concluso.

Dei 166 edifici il 78% presenta stato di danno basso – medio (1 e 2) e solo il 4% ha subito il crollo di almeno il 30% delle strutture portanti (danno 4); nel 7% dei casi il livello di costo è quello minimo (L_1), nel 81% intermedio (L_2, L_3), nel rimanente 12% alto (L_4, L_5).

L'esame della ripartizione dei costi sostenuti per le varie tipologie di intervento evidenzia come l'unico intervento sempre effettuato, anche se con esito più o meno discutibile, sia quello di riparazione e/o consolidamento delle murature portanti: nel 37% dei casi per le murature si è speso fra il 30 e il 40% del costo totale sostenuto, solo per il 5% degli edifici il costo degli interventi sulle murature non ha superato il 10%. Nel 41% dei casi il suddetto costo non ha superato 1/3 del totale, nel 58% il rafforzamento delle murature ha richiesto fra 1/3 e 2/3 del costo totale, solo per l'1% ha superato i 2/3 del totale.

I cosiddetti interventi minimi, ossia gli interventi richiesti obbligatoriamente dalla D.G.R. n. 5180/98, consistenti, oltre a quelli che coinvolgono le murature portanti, in interventi di collegamento fra murature e fra orizzontamenti e muri ed in eventuali interventi in fondazione, sono stati realizzati nel 99,4% dei casi, con esito, oggettivamente, soddisfacente. Il pragmatismo del pacchetto interventi minimi sembra, dunque, essere una risposta adeguata al concetto generico di miglioramento sismico definito dalla normativa nazionale vigente all'epoca. Nel 65% degli edifici il costo degli interventi minimi è stato non superiore ad 1/3 del costo totale sostenuto, per il 32% è risultato compreso fra 1/3 e 2/3 e per il rimanente 3% ha superato i 2/3 del costo totale.

Si deve sottolineare, però, che le percentuali più alte del costo degli interventi minimi si sono registrate in edifici che presentavano danneggiamento per solo cedimento fondale. Per il 47% degli edifici, infatti, il costo del consolidamento delle strutture fondali è compreso in quello degli interventi minimi. Del suddetto 47%, l'86% ha avuto un costo degli interventi in fondazione non superiore ad 1/3 del costo totale sostenuto, in particolare per il 38% non ha superato il 10% del costo totale, ma per il 3% ha superato i 2/3 del costo totale. L'incidenza di tali lavorazioni, dunque, può produrre variazioni apprezzabili del costo degli interventi minimi.

Limitando l'analisi ai collegamenti fra murature e fra orizzontamenti e muri si osserva che nel 43% dei casi il costo è circa il 20% (15 ÷ 25%) del totale, nel 14% ne supera 1/3.

Nel 98% degli edifici si è effettuato il consolidamento o la demolizione e ricostruzione di orizzontamenti, in generale non richiesto dalla normativa, ma reso necessario dalla precarietà delle strutture esistenti o reso conveniente dall'obbligo del collegamento: il costo di tali interventi è stato per il 44% non superiore ad 1/3 del costo totale sostenuto, per il 43% compreso fra 1/3 e 2/3 del costo totale. Nel 33% degli edifici del campione il costo degli interventi sui solai è stato circa il 30% (25 ÷ 35%) del totale, nel 25% circa il 40% (36 ÷ 45%). Riepilogando i dati illustrati (Tabella 10) si osserva che gli interventi non obbligatori vengono realizzati, in parte, a discapito di quelli sulle murature.

Per valutare il rapporto benefici/costi sono stati definiti dei costi di riferimento, ossia ottimali dal punto di vista della normativa. Essi sono quantificati a partire dal massimo contributo concedibile definito dalla D.G.R. n. 5180/98. I costi di riferimento sono stati ottenuti sulla base dei criteri utilizzati nella definizione dei contributi, attraverso un processo di normalizzazione delle principali variabili, ossia: dimensioni dell'edificio, estensione del danneggiamento, presenza di carenze strutturali gravi, circostanze che comportano un aggravio dei costi contemplate dalla normativa, valore del coefficiente di amplificazione Fa, compatibilità degli interventi

con la tutela degli aspetti architettonici, storici e ambientali, incremento di resistenza conseguito, interventi minimi già esistenti. Partendo dal valore del contributo, previa osservazione dei costi effettivi delle varie tipologie di intervento dei progetti pervenuti, si è attribuito, al massimo, 1/3 del contributo agli interventi minimi e, al massimo, 2/3 al consolidamento delle murature.

Il rapporto costo/costo di riferimento permette una stima di quello costo/benefici: valori compresi fra 0,5 e 1,5 indicano risultati accettabili.

Relativamente al consolidamento delle murature si trova che nel 56% dei casi si spende meno del previsto, nel 29% il costo supera quello di riferimento rimanendo, però, inferiore al doppio (nel 19% degli edifici il costo supera il valore previsto non più del 50%), nel 15% il costo supera il doppio del valore di riferimento: sono casi in cui l'intervento sulle murature è eccessivo (Figura 29 per i casi Fa = 1.0 e Fa = 1.2, Figura 35 per l'intero campione). Da notare come nel 31% degli edifici il costo degli interventi sulle murature è minore del valore di riferimento, ma anche del costo degli interventi non obbligatori (Figura 32 per i casi Fa = 1.0 e Fa = 1.2, Figura 36 per l'intero campione). Complessivamente, si può affermare che nel 53% degli edifici il rapporto costi/benefici è soddisfacente.

Tabella 10. Percentuali di edifici per i quali il costo degli interventi (consolidamento muri, interventi minimi, interventi non obbligatori) è minore di 1/3 e compreso fra 1/3 e 2/3 del costo totale sostenuto.

edifici: 166	≤ 1/3	1/3 ÷ 2/3
Consolidamento murature	41%	58%
Interventi minimi	65%	32%
Interventi non obbligatori	44%	43%

Tabella 11. Percentuali di edifici per i quali il rapporto benefici/costi conseguito nel consolidamento delle murature e negli interventi minimi è, rispettivamente," alto" e " basso"

Benefici / Costi	Alto	Basso
Consolidamento murature	53%	47%
Interventi minimi	44%	56%

Tabella 12. Costo sostenuto/contributo massimo concedibile (per interventi strutturali e finiture connesse)

Edifici = 166	Costo sostenuto / Contributo massimo concedibile (per interventi strutturali e finiture connesse)				
	< 1	> 1	0,5 ÷ 1	1 ÷ 1,5	0,8 ÷ 1,2
% edifici	67	33	54	46	42

Relativamente agli interventi minimi si trova che nel 44% dei casi si spende meno del previsto, nel 28% il costo supera il valore di riferimento rimanendo, però, inferiore al doppio (nel 18% degli edifici il costo supera il valore previsto non più del 50%), nel 22% il costo supera il doppio del previsto: sono casi in cui gli interventi minimi sono particolarmente costosi (Figura 30 per i casi Fa = 1.0 e Fa = 1.2, Figura 35 per l'intero campione). Complessivamente, si può affermare che nel 44% degli edifici il rapporto costi/benefici è soddisfacente (Figura 35). Nella Tabella 11 si riepilogano i risultati.

Un risultato, confermato da un confronto con le elaborazioni degli anni precedenti, è che un buon rapporto costo/benefici si raggiunge in maggior misura considerando gli interventi sulle murature, anche se dal punto di vista degli interventi minimi le elaborazioni attuali presentano un miglioramento (Figura 35).

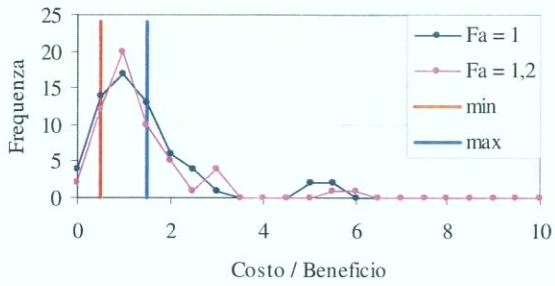


Figura 29. Distribuzione di frequenza del rapporto tra costi medi normalizzati e loro valori di riferimento per consolidamento murature. Le linee verticali delimitano i valori ottimali.

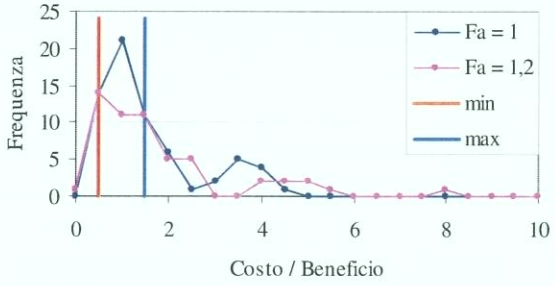


Figura 30. Distribuzione di frequenza del rapporto tra costi medi normalizzati e loro valori di riferimento per interventi mimi. Le linee verticali delimitano i valori ottimali.

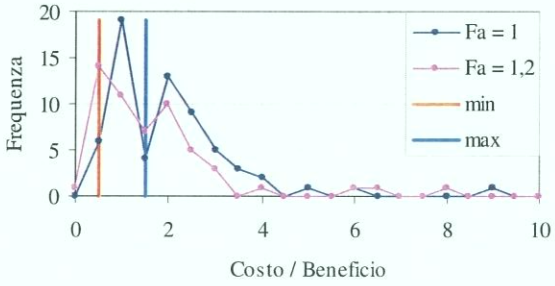


Figura 31. Distribuzione di frequenza del rapporto tra costo per consolidamento murature e costo per interventi minimi. Le linee verticali delimitano i valori ottimali.

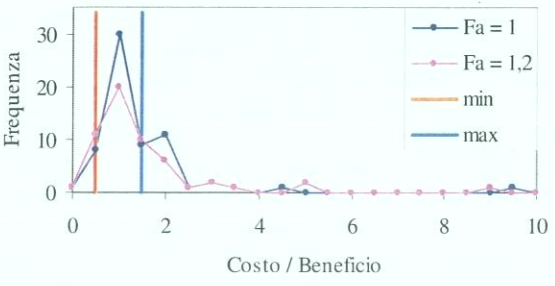


Figura 32. Distribuzione di frequenza del rapporto tra costo per consolidamento murature e costo per interventi non obbligatori. Le linee verticali delimitano i valori ottimali.

Fra i 166 edifici esaminati il 67% presenta un costo totale degli interventi strutturali e relative finiture connesse inferiore al massimo contributo concedibile e il 54% ha richiesto una spesa compresa fra la metà e l'intero contributo massimo concedibile. Per il 27% degli edifici il costo ha superato il contributo non più del suo 50%, per il 42% lo scarto fra costo totale e contributo non supera il 20% (Tabella 12).

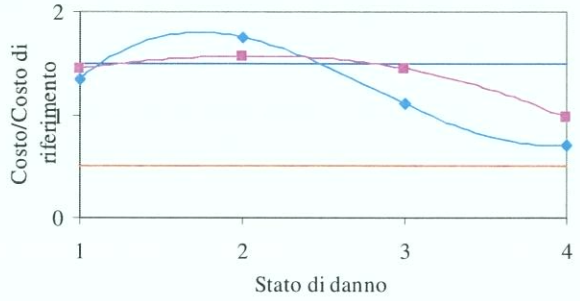


Figura 33. Rapporti fra costi medi normalizzati e loro valori di riferimento e relative linee di tendenza in funzione dello stato di danno:costo per consolidamento murature (rombo) e costo per interventi minimi (quadrato). Le linee orizzontali delimitano i valori ottimali.

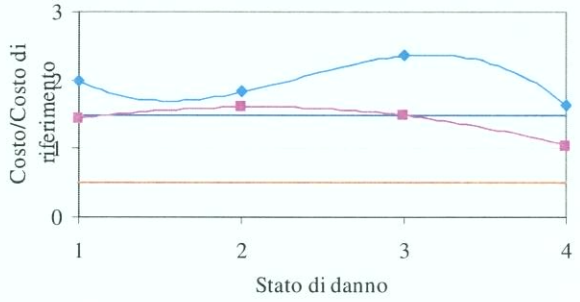


Figura 34. Confronto fra costo per consolidamento murature e per interventi minimi (rombo) e fra costo per consolidamento murature e per interventi non obbligatori (quadrato) in funzione dello stato di danno. Le linee orizzontali delimitano i valori ottimali.

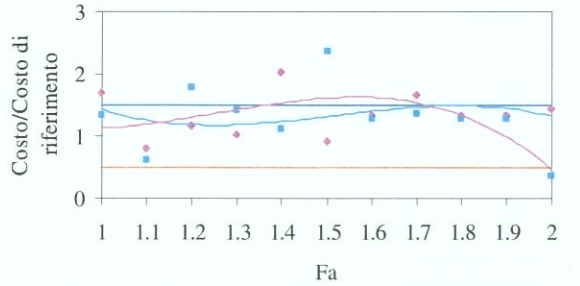


Figura 35. Rapporti fra costi medi normalizzati e loro valori di riferimento in funzione di Fa: costo per consolidamento murature (rombo) e per interventi minimi (quadrato). Le linee orizzontali delimitano i valori ottimali.

Analizzando la variazione dei dati con il livello di danneggiamento dell'edificio si osserva che, sia per il consolidamento delle murature che per gli interventi di collegamento, un buon rapporto benefici/costi è stato ottenuto in maggior misura sugli edifici più danneggiati (Figura 33). La Figura 34 evidenzia, ancora una volta, come l'intervento più dispendioso sia stato quello relativo alle murature.

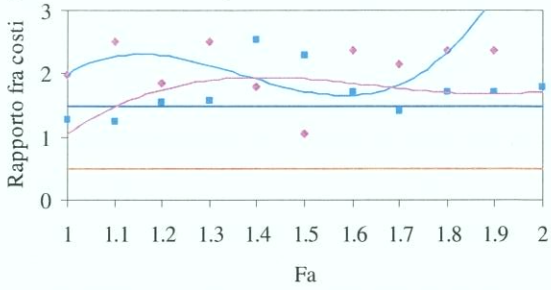


Figura 36. Confronto fra costo per consolidamento murature e per interventi minimi (rombo) e fra costo per consolidamento murature e per interventi non obbligatori (quadrato) in funzione di Fa. Le linee orizzontali delimitano i valori ottimali.

6 CONCLUSIONI

Nei casi di progetti conclusi, arrivati cioè al termine del loro iter di presentazione del progetto, esecuzione dei lavori e rilascio del contributo, è ora possibile approcciare una valutazione globale della qualità dell'intervento. Partendo dalle singole valutazioni esperte dei tre aspetti fondamentali dell'intervento (progetto nel § 2.4, cantiere nel § 4.3, indicatori economici nel § 5), si è poi mediato attraverso opportuni pesi (0,6 per il progetto nella sua ultima versione, 1 per il cantiere e 1 per il lato economico) i tre voti globali.

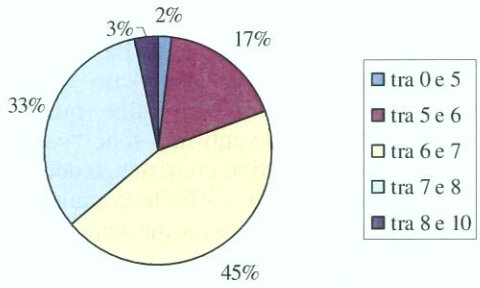


Figura 37. Distribuzione delle valutazioni globali della qualità dell'intervento

Per fare ciò è stato necessario convertire il giudizio espresso in termini di rapporti tra costi sostenuti e costi attesi in voti variabili da 0 a 10. Si ottiene così un grafico che esprime la qualità globale dell'intervento (Figura 37): la maggior parte degli edifici presenta una qualità sufficiente o buona; solo il 3% ha una qualità ottima, mentre il 2% ha una qualità scarsa.

E' sembrato opportuno non includere nella media numerica la valutazione sulla qualità della conservazione architettonica, la cui valenza sfugge ad una quantificazione e non è omogenea con gli altri aspetti esaminati. Inoltre, una sua quantificazione a livello di coefficienti maggiorativi del contributo concedibile è già compresa nel calcolo degli indicatori economici.

Alla luce dei dati raccolti ed elaborati in questo articolo e dell'esperienza accumulata nell'attività di controllo, è possibile esprimere, almeno come tendenza, le seguenti valutazioni sulla qualità della ricostruzione, da un punto di vista squisitamente strutturale. L'81% degli interventi può ritenersi soddisfacente, con particolare riferimento a:

a) sostanziale rispetto delle normative nazionali sulle costruzioni nei progetti esaminati;
b) costante presenza di studi geologici e geotecnici proporzionati all'importanza dell'intervento in progetto ed alla complessità del sottosuolo;
c) eliminazione quasi generalizzata dei meccanismi di collasso fuori piano attraverso l'esecuzione degli interventi minimi, con particolare riferimento all'esecuzione dei collegamenti tra murature confluenti e tra muri e orizzontamenti;
d) positivo approccio della normativa regionale al concetto di "miglioramento sismico", che perde l'aleatorietà della normativa nazionale vigente all'epoca e viene concretizzato attraverso:
   - l'obbligatorietà degli interventi minimi;
   - l'eliminazione obbligatoria in fase di progettazione delle carenze strutturali individuate;
   - il raggiungimento, sia pur convenzionale, di una soglia minima di resistenza;
e) sostanziale correttezza nell'utilizzo del contributo concesso.

Emergono, comunque, delle perplessità nel processo che ha guidato gli interventi di riparazione, riassumibili nei punti seguenti:

a) scarso approfondimento della conoscenza degli elementi strutturali allo Stato Originario, con particolare riferimento alla qualità muraria (Spesso gli interventi non sono "calibrati" in relazione all'effettiva consistenza dei materiali costituenti le pareti; difficile coniugare in termini di interventi l'efficacia meccanica e le esigenza di conservazione);
b) sostanziale adeguatezza dei materiali impiegati ma scarsa conoscenza dei processi di controllo in cantiere, con particolare riferimento a materiali come il legno o le malte;
c) a volte non adeguata la preparazione delle maestranze, inadeguatezza tecnologica (ad esempio per l'intervento di iniezioni di malta cementizia) e scarso controllo;
d) frequente ricorso a demolizioni e ricostruzioni di elementi strutturali, non sempre giustificate dall'effettivo danneggiamento dovuto al sisma;
e) assenza o insufficienza di valutazioni di sicurezza per elementi preesistenti (ad esempio orizzontamenti lignei storici) anche solo per carichi verticali, frutto di scarsa sensibilità dei Progettisti e di mancanza di riferimenti normativi oggettivi che ne definiscano la resistenza in funzione della loro conoscenza e dello stato di conservazione;
f) difficoltà di modellazione strutturale nel caso di complessi edilizi e insufficiente conoscenza dei livelli di resistenza delle murature; le verifiche dei vari meccanismi di collasso assumono una valenza più ai fini dell'individuazione degli elementi di vulnerabilità e, quindi, come ausilio nella progettazione dell'intervento, che ai fini di una valutazione numerica della sicurezza reale.

Quest'ultima considerazione, se vera per le direttive vigenti all'epoca, caratterizzate da una valutazione convenzionale della sicurezza, assume ancora maggiore interesse alla luce delle recenti evoluzioni normative, che su questi temi potrebbero indurre nel progettista una sensazione illusoria di padronanza sui meccanismi che regolano la sicurezza sia statica che sismica dell'edificio.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per la preziosa collaborazione nella raccolta dei dati Fabio Campagnacci, Marcella Cresti, Claudio Serafini, Luigi Daniele, Alessandro De Maria, Gianluca Fagotti, Gianluca Mannocci, Sara Mascelloni, Francesco Proietti, Francesco Savi, Stefania Aglietti, Federico Bernardini, Marco Cittadini, Cinzia Gioacchini, Francesca Pieretti, Catia Sereni.

BIBLIOGRAFIA

De Sortis A., Nasini U., Aisa E., Gravina A., Fantozzi F., Barelli L., 2004a, *"Una procedura per la valutazione della qualità della ricostruzione dopo il sisma del 1997 in Umbria – Parte I: metodologia"*, XI Conv. Naz. ANIDIS "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio.

De Sortis A., Nasini U., Aisa E., Gravina A., Fantozzi F., Barelli L., 2004b, *"Una procedura per la valutazione della qualità della ricostruzione dopo il sisma del 1997 in Umbria – Parte II: analisi dei primi risultati"*, XI Conv. Naz. ANIDIS "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio.

Zadeh L. A., *"The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning" – I. Information Sciences, 8, 199-249, 1975.*

APPENDICE

POSSIBILI CARENZE STRUTTURALI E INTERVENTI MINIMI PER EDIFICI IN MURATURA (D.G.R. n. 5180/98)

Carenze strutturali

- Carenza di resistenza delle murature dovuta a cattiva qualità dei materiali o mancanza di collegamento tra i paramenti o presenza di murature portanti in forati;
- Murature portanti in falso su solai;
- Irregolarità di geometria in pianta di forte entità;
- Irregolarità della maglia muraria in elevazione;
- Coperture realizzate con orditura principale priva di collegamento trasversale.

Interventi minimi

- Riparazione dei danni;
- Riduzioni dei vuoti nei maschi murari;
- Collegamento fra orizzontamenti e maschi murari;
- Collegamento fra maschi murari;
- Riduzione delle spinte in copertura o su strutture voltate.