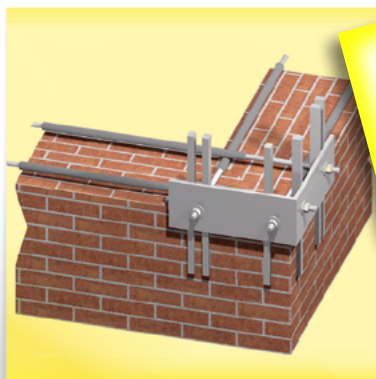


Renata Prescia – Liborio Panzeca e Teotista Panzeca  
Antonella Mami – Piera Di Franco

# IL RESTAURO TRA CONSERVAZIONE E SICUREZZA

AGGIORNATO ALLE NORMATIVE VIGENTI



 **PRONTO  
GRAFILL** 

Clicca e richiedi di essere contattato  
per **informazioni** e **promozioni**

ORIENTAMENTI CULTURALI DI RESTAURO, STRUTTURALI E TECNOLOGICI NEGLI INTERVENTI  
RIGUARDANTI LE COSTRUZIONI MURARIE: STRUTTURE DI FONDAZIONE ■ STRUTTURE IN ELE-  
VAZIONE ■ ORIZZONTAMENTI ■ COPERTURE ■ ELEMENTI SPINGENTI ■ ELEMENTI AGGETTANTI

  
GRAFILL

Renata Prescia, Liborio Panzeca e Teotista Panzeca,  
Antonella Mamì – Piera Di Franco  
**IL RESTAURO TRA CONSERVAZIONE E SICUREZZA**

ISBN 13 978-88-8207-848-5  
EAN 9 788882 078485

Manuali, 193  
Prima edizione, aprile 2016

Il restauro tra conservazione e sicurezza / Renata Prescia ... [et al.].  
– Palermo : Grafill, 2016.  
(Manuali ; 193)  
ISBN 978-88-8207-848-5  
1. Architettura – Restauro. I. Prescia, Renata <1960->.  
720.288 CDD-23 SBN Pal0288926  
*CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

Il volume è **disponibile anche in eBook** (formato \*.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.  
Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con c/c postale, bonifico bancario, carta di credito e PayPal.  
Per i pagamenti con carta di credito e PayPal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno Smartphone o un Tablet il Codice QR sottostante.



I lettori di Codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo  
Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313  
Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di aprile 2016

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.



Clicca qui e scopri come richiedere maggiori informazioni sui nostri prodotti  
Sarai contattato da un consulente editoriale che ti riserverà uno **SCONTO SPECIALE**

## SOMMARIO

<b>CONTRIBUTI</b> .....	p.	1
<b>PROFILI DEGLI AUTORI</b> .....	"	2
<b>➤ ORIENTAMENTI CULTURALI E NORMATIVI PER IL PROGETTO DI CONSERVAZIONE</b> .....	"	3
RENATA PRESCIA		
<b>➤ INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO ALLA LUCE DELLE VIGENTI NORMATIVE</b> .....	"	15
LIBORIO PANZECA e TEOTISTA PANZECA		
<b>1. STRUTTURE DI SOSTEGNO: FONDAZIONI</b> .....	"	18
1.1. Cedimento della base fondale .....	"	18
1.2. Allargamento della base fondale.....	"	19
1.2.1. Caso di accessibilità sui due lati .....	"	19
1.2.2. Caso di accessibilità su un solo lato.....	"	19
1.3. Interventi di sottomurazione .....	"	21
1.4. Intervento con pali di piccole dimensioni (pali radice) .....	"	23
1.5. Interventi con palificate .....	"	26
<b>2. STRUTTURE VERTICALI: MURATURE</b> .....	"	29
2.1. Meccanismi di rottura .....	"	31
2.2. Meccanismi di rottura in presenza di forze agenti fuori piano .....	"	31
2.2.1. Interventi per la messa in sicurezza, in presenza di forze agenti fuori piano.....	"	32
2.3. Meccanismi di rottura in presenza di azioni agenti in piano o per cedimenti fondali .....	"	39
2.3.1. Forme di danneggiamento dovute al sisma.....	"	40
2.3.2. Forme di danneggiamento dovute a cedimenti differenziati della fondazione o a modifiche antropiche .....	"	40
2.3.3. Forme di danneggiamento in muratura diffusamente fratturata.....	"	41
2.3.4. Riconnessione di lesioni dovute al sisma.....	"	41

2.3.5.	Riconnessione di lesioni dovute a cedimenti differenziati della fondazione o a modifiche antropiche .....	p.	42
2.3.6.	Consolidamento di muratura diffusamente fratturata .....	"	44
2.4.	Interventi dettati in normativa, ma sconsigliati .....	"	45
<b>3.</b>	<b>ORIZZONTAMENTI: SOLAI E CONTROSOFFITTI</b> .....	"	46
3.1.	Solai .....	"	46
3.1.1.	Rinforzo delle travi di legno esistenti .....	"	46
3.1.2.	Sostituzione di un solaio di legno secondo Normativa .....	"	49
3.2.	Interventi dettati in normativa, ma sconsigliati .....	"	52
3.3.	Controsoffitti .....	"	54
3.3.1.	Ricostruzione di controsoffitti piani non spingenti .....	"	54
<b>4.</b>	<b>COPERTURE</b> .....	"	56
4.1.	Capriate .....	"	56
4.1.1.	Meccanismo di rottura delle capriate .....	"	58
4.1.2.	Intervento per la messa in sicurezza di una capriata per eccesso di carico .....	"	60
4.1.3.	Sostituzione di una copertura con capriate .....	"	62
4.1.4.	Sostituzione di solai in latero-cemento con capriate .....	"	63
4.1.5.	Sostituzione di copertura con capriate semplici .....	"	66
4.1.6.	Ricostruzione di copertura con capriate semplici .....	"	67
4.1.7.	Modifica di una di una capriata semplice in capriata Polenceau .....	"	69
4.1.8.	Sostituzione di copertura con sistema a padiglione .....	"	71
<b>5.</b>	<b>ELEMENTI SPINGENTI: ARCHI E VOLTE</b> .....	"	73
5.1.	Archi .....	"	73
5.1.1.	Meccanismo di rottura dell'arco .....	"	73
5.1.2.	Interventi per la messa in sicurezza degli archi .....	"	76
5.2.	Volte .....	"	78
5.2.1.	Meccanismo di rottura delle volte finte .....	"	78
5.2.2.	Interventi per il miglioramento della sicurezza delle volte finte .....	"	80
5.2.3.	Meccanismo di rottura della volta reale e realina .....	"	80
5.2.4.	Interventi per la messa in sicurezza delle volte reali o realine .....	"	86
<b>6.</b>	<b>ELEMENTI AGGETTANTI: BALCONI, PARASTE, CORNICIONI E SCALE</b> .....	"	91
6.1.	Balcone .....	"	91
6.1.1.	Meccanismo di rottura del balcone a mensola .....	"	91
6.1.2.	Interventi per la messa in sicurezza del balcone con mensola in pietra .....	"	92

6.1.3.	Meccanismo di rottura della lastra .....	p.	95
6.1.4.	Interventi per la messa in sicurezza del balcone con mensole in ferro .....	"	96
6.2.	Paraste.....	"	97
6.2.1.	Meccanismo di rottura delle paraste .....	"	97
6.2.2.	Interventi per la messa in sicurezza delle paraste .....	"	98
6.3.	Cornicioni .....	"	100
6.3.1.	Meccanismo di rottura dei cornicioni .....	"	100
6.3.2.	Interventi per la messa in sicurezza dei cornicioni .....	"	100
6.4.	Scale a mensola.....	"	101
6.4.1.	Meccanismo di rottura delle scale a mensola.....	"	101
6.4.2.	Interventi per la messa in sicurezza delle scale a mensola .....	"	103
▾	<b>CULTURA TECNOLOGICA E PROGETTO SOSTENIBILE PER L'ARCHITETTURA STORICA</b> .....	"	105
	ANTONELLA MAMÌ		
▾	<b>L'USO DEI PRESIDI ANTISISMICI NELLA TRADIZIONE COSTRUTTIVA STORICA IN SICILIA</b> .....	"	115
	PIERA DI FRANCO		
	Catene metalliche .....	"	115
	Radiciamenti metallici .....	"	118
	Travi di legno .....	"	122
	<b>SINOSSI DELLA NORMATIVA</b> .....	"	123
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	"	125



Clicca qui e scopri come richiedere maggiori informazioni sui nostri prodotti  
Sarai contattato da un consulente editoriale che ti riserverà uno **SCONTO SPECIALE**

## CONTRIBUTI

Le dissertazioni inserite nel testo hanno ricevuto un parziale finanziamento FFR2012 dell'Università di Palermo riguardante il tema: *Pratiche metodologiche e Strumenti innovativi per la salvaguardia dell'architettura storica – Consolidamento, restauro, architettura storica.*

Gruppo di ricerca:

- Prof. Teotista Panzeca (coordinatore);
- Prof.ssa Antonella Mami;
- Prof.ssa Renata Prescia.

Molti argomenti della dissertazione “*Interventi di consolidamento alla luce delle vigenti normative*” rappresentano una rielaborazione della tesi di laurea redatta da Liborio Panzeca: *Il restauro tra conservazione e sicurezza – Interventi di consolidamento dell'architettura storica.* Rel. Prof.ssa Renata Prescia, Corr. Arch. Liborio Zito, phd, Scuola Politecnica, Corso di laurea in Architettura 4/S, a.a. 2013-2014.

Alcuni degli esempi riportati nel testo a titolo esemplificativo, aventi come scopo quello di mostrare la strategia da impiegare negli interventi di restauro strutturale e tecnologico, sono stati oggetto di verifica con il programma Karnak.sGbem, basato sul metodo simmetrico degli elementi di contorno ed implementato da un gruppo di ricercatori di Palermo, di Enna e da alcuni professionisti.

Il gruppo è costituito da T. Panzeca, F. Cucco, S. Terravecchia con contributi di M. Salerno e L. Zito.

## PROFILI DEGLI AUTORI

**Renata Prescia** (Palermo 1960), architetto, dottore di ricerca in Conservazione dei beni architettonici, professore associato in Restauro Architettonico, afferente al Dipartimento di Architettura della Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Palermo. I suoi interessi di ricerca sono prevalentemente orientati sui temi dei rapporti tra preesistenze monumentali e nuovi innesti, con specifica attenzione alle componenti storico-materiche. Tra le pubblicazioni più recenti: *Restauri a Palermo* (2012), *Umanesimo e città storiche* (2013), *Il restauro del moderno. Problemi di tutela, problemi di progetto* (2013).

**Teotista Panzeca** (Caccamo 1944), ingegnere, professore ordinario di Scienza delle Costruzioni, afferente al Dipartimento di Ingegneria civile, ambientale, aerospaziale, dei materiali della Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Palermo, oggi in quiescenza. La sua ultima attività di ricerca ha riguardato gli aspetti teorici ed applicativi dell'innovativo Metodo simmetrico degli elementi di contorno, alternativo al metodo degli elementi finiti, redigendo il programma di calcolo Karnak.sGbem assieme al prof. Filippo Cucco ed all'arch. Silvio Terravecchia, phd, e con i contributi di Maria Salerno, phd, e Liborio Zito, phd. Questo programma ha il pregio di effettuare, nel continuo bidimensionale analisi in elasticità, in plasticità, nei problemi di contatto e di frattura, dei quali temi ha pubblicato lavori scientifici nelle riviste di settore.

**Antonella Mami** (Palermo 1965) è architetto dal 1989 e professore associato di Tecnologia dell'Architettura presso il Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo. Nell'ambito della ricerca universitaria ha condotto ricerche e pubblicato contributi sui seguenti temi: Conoscenza degli elementi costruttivi e dei materiali per l'edilizia storica e contemporanea; deterioramento dei materiali e degli elementi tecnici, con particolare attenzione alla prevenzione; Principi di sostenibilità nell'architettura pre-moderna; Vulnerabilità sismica e riabilitazione di elementi non strutturali degli edifici, Tecnologie del gesso negli edifici tradizionali siciliani, anche al fine di individuare criteri per una riproposizione nel recupero edilizio e nelle nuove costruzioni. Recentemente è stata coinvolta in ricerche sulla rigenerazione urbana sostenibile. È membro del comitato scientifico della rivista Edilizia Specializzata del redattore Be-Ma.

**Liborio Panzeca** (Palermo 1980), dottore in Architettura presso la Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Palermo con la tesi: *Il restauro tra conservazione e sicurezza – Interventi di consolidamento dell'architettura storica*, relatore Prof.ssa Renata Prescia, correlatore Liborio Zito. Svolge ricerche sui metodi costruttivi locali e sulle soluzioni strutturali impiegate nella tradizione, proponendo metodi innovativi per la risoluzione di problematiche strutturali con particolare attenzione ai temi della sostenibilità, durata, efficacia, economia e minima invasività. Conoscitore del programma Karnak.sGbem ed esperto in tecniche di rappresentazione digitale con programmi come VectorWorks, Rhinoceros, Archicad, AutoCad, PowerCadd.

**Piera Di Franco** (Licata 1987), architetto, specialista in Beni Architettonici e del Paesaggio per il Restauro dei Monumenti (Università La Sapienza di Roma). Attualmente Cultore della materia per il corso di Laboratorio di Restauro dei Monumenti e Teoria e Storia del Restauro tenuto dalla Prof.ssa Renata Prescia (Università di Palermo). Ha pubblicato il saggio monografico dal titolo *Un secolo di restauri nella cattedrale di Agrigento (1860-1960)* (2016).



## ORIENTAMENTI CULTURALI E NORMATIVI PER IL PROGETTO DI CONSERVAZIONE

RENATA PRESCIA

Lo sviluppo delle teorie italiane del restauro, da quello *Filologico* di fine Ottocento (Boito), a quello *Scientifico* degli anni '30 del Novecento (Giovannoni), a quello *Critico* del dopoguerra (Bonelli e Pane; Brandi) è, allo stato attuale, approdato a posizioni conservative che possiamo sintetizzare nella seguente definizione:

*«Il restauro è l'esecuzione di un progetto di architettura che si applica ad una preesistenza, compie su di essa tutte le operazioni tecniche idonee a conservarne la consistenza materiale, a ridurre i fattori intrinseci ed estrinseci di degrado, per consegnarla alla fruizione come strumento di soddisfazione dei bisogni, con le alterazioni strettamente indispensabili, utilizzando studio preventivo e progetto come strumenti d'incremento alla conoscenza»<sup>1</sup>.*

È, comunque, Progetto di architettura che deve rispettare i tre criteri fondamentali del Minimo Intervento, Reversibilità, Compatibilità (chimico-fisica), così come egregiamente riassunto dopo il vasto dibattito degli anni '80 e '90<sup>2</sup>.

Il restauro si riconferma comunque come l'ultima tappa, a cui arrivare eccezionalmente, in un processo di fasi normato nella vigente legge di tutela.

---

### DECRETO LEGISLATIVO 22 GENNAIO 2004, N. 42

#### CODICE DEI BENI CULTURALI

Recepito dalla Regione Siciliana con Circolare n. 7 del 9 marzo 2006 da parte dell'Assessorato Regionale dei Beni Culturali e Ambientali.

#### Sezione II – *Misure di conservazione*

#### Articolo 29 – *Conservazione*

1. La *conservazione* del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro.

2. Per *prevenzione* si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto.

---

<sup>1</sup> A. Bellini, *Definizione di restauro*, in B.P. Torsello (a cura di), *Che cos'è il restauro? Nove studiosi a confronto*, Venezia, 2005, pp. 21-24.

<sup>2</sup> G. Carbonara, *Teoria e metodi del restauro*, in Id., *Restauro architettonico*, vol. I, Torino, 1996, pp. 3-112.

3. Per *manutenzione* si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti.

4. Per *restauro* si intende l'intervento diretto sul bene attraverso un complesso di operazioni finalizzate all'integrità materiale ed al recupero del bene medesimo, alla protezione ed alla trasmissione dei suoi valori culturali. **Nel caso di beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale.**

Nei confronti degli interventi di consolidamento, la cultura del restauro del Novecento, più sopra indicata, si è espressa, attraverso i suoi Documenti culturali, le cosiddette Carte del restauro, in maniera ambigua, di fatto incoraggiando, nelle dialettiche *tradizionale/moderno, visibilità/invisibilità*, le seconde istanze tra le due.

---

#### **Voto del congresso, 1883 (R. filologico)**

4. Nei monumenti che traggono la bellezza, la singolarità, la poesia del loro aspetto dalla varietà dei marmi, dei mosaici, dei dipinti, oppure dal colore della loro vecchiezza o dalle circostanze pittoresche in cui si trovano, o perfino dallo stato rovinoso in cui giacciono, le opere di consolidamento, ridotte allo strettissimo indispensabile, non dovranno scemare possibilmente in nulla codeste ragioni intrinseche ed estrinseche di allettamento artistico.

#### **Carta di Atene\_1931 (R. scientifico)**

**Art. 5:** Gli esperti hanno inteso varie comunicazioni relative all'impiego di materiali moderni per il consolidamento degli antichi edifici; ed approvano l'impiego giudizioso di tutte le risorse della tecnica moderna, e più specialmente del cemento armato. Essi esprimono il parere che ordinariamente questi mezzi di rinforzo debbano essere dissimulati per non alterare l'aspetto e il carattere dell'edificio da restaurare; e ne raccomandano l'impiego specialmente nei casi in cui essi permettono di conservare gli elementi in situ evitando i rischi della disfattura e della ricostruzione.

#### **Consiglio Superiore per le Antichità e Belle Arti. Norme per il restauro dei monumenti. Carta del restauro italiana \_1932**

**Art. 9:** Che allo scopo di rinforzare la compagine statica di un monumento e di reintegrare la massa, tutti i mezzi costruttivi modernissimi possano recare ausili preziosi e sia opportuno valersene quando l'adozione di mezzi costruttivi analoghi agli antichi non raggiunga lo scopo; e che del pari i sussidi sperimentali delle varie scienze debbano essere chiamati a contributo per tutti gli altri esempi minuti e complessi di conservazione delle strutture fatiscenti, nei quali ormai i procedimenti empirici debbono cedere il campo a quelli rigidamente scientifici.

#### **Carta di Venezia\_1964 (Restauro critico)**

**Art. 10:** Quando le tecniche tradizionali si rivelano inadeguate, il consolidamento di un monumento può essere assicurato mediante l'ausilio di tutti i più moderni mezzi di struttura e di conservazione, la cui efficienza sia stata dimostrata da dati scientifici e sia garantita dall'esperienza.

#### **Carta del restauro\_1972**

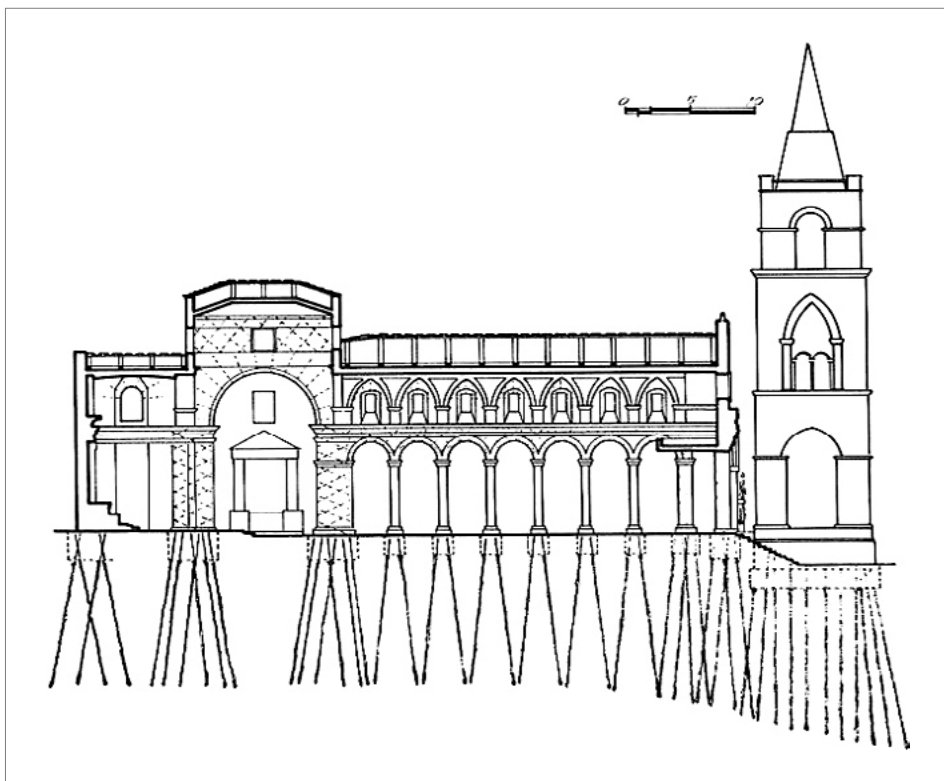
**Art. 7:** Sono ammesse modificazioni e nuove inserzioni a scopo statico e conservativo nella struttura interna o nel sostrato o supporto purché all'aspetto, dopo compiuta l'operazione, non risulti alterazione né cromatica né per la materia in quanto osservabile in superficie.

---

## Storiografia

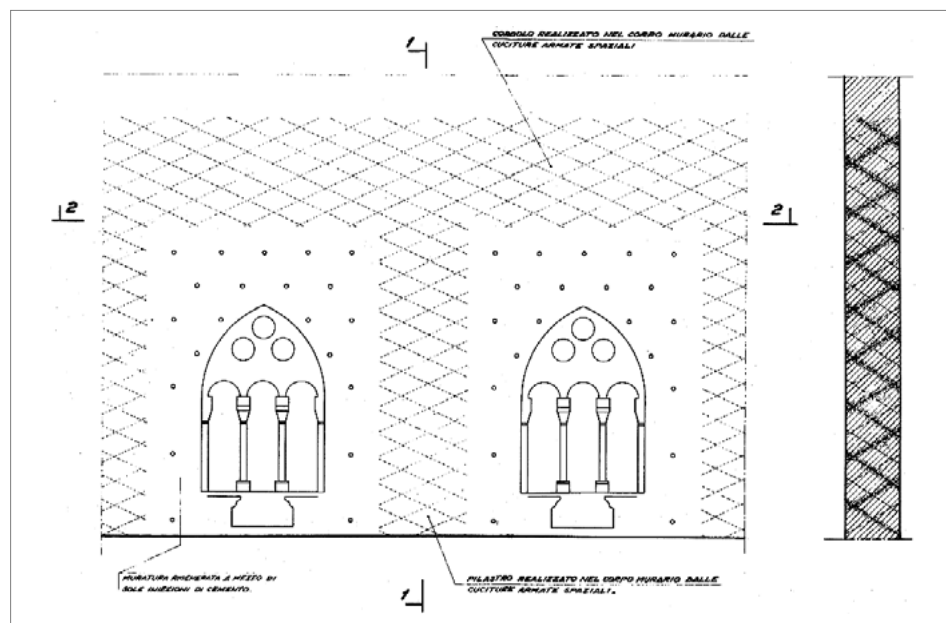
Contro questo stato di cose, che nella prassi ha portato ad interventi (v. Figure 1a e 1b) in cui il progetto di consolidamento spesso esautorava il progetto di restauro architettonico, si scagliava vigorosamente, tra gli altri, Paolo Marconi:

*«Sinora l'esigenza di dissimulare i mezzi di rinforzo per non alterare l'aspetto e il carattere degli edifici ha giustificato il ricorso a tecnologie innovative che permettono di realizzare rinforzi invisibili, ma generalmente irreversibili, adulteranti, incompatibili e poco durabili, conservando di fatto l'aspetto e non la struttura della fabbrica. Ma, alla luce di una più matura esperienza, l'uso delle tecniche tradizionali si deve considerare applicabile non solo ai semplici miglioramenti delle condizioni statiche ma anche a molti casi di patologie ordinarie» (Carta della conservazione e del restauro degli oggetti d'arte e di cultura, 1987 CNR)<sup>3</sup>.*



**Figura 1a.** Duomo di Nicosia: sezione longitudinale, con indicazione della sottofondazione a "pali radice" e delle "cuciture armate" nei muri in elevato (da G. Carbonara (a cura di), *Restauro e cemento in architettura*, Roma, 1991).

<sup>3</sup> Paolo Marconi (1933-2010) è stato professore di Storia dell'architettura a Palermo dal 1976 al 1981 e poi professore di Restauro dei monumenti a Roma. Cfr P. Marconi, *Restauro dei monumenti. Cultura, progetti e cantieri 1967-2010*, a cura di N. Marconi, Roma, 2012.



**Figura 1b.** Palazzo Chiaramonte di Palermo: interventi sulle murature (da G. Carbonara (a cura di), *Restauro e cemento in architettura*, Roma 1991).

Parallelamente Antonino Giuffrè (1933-97), partendo dalla considerazione che un edificio murario ben costruito sopporta il sisma con sicurezza (Città di Castello 1992), mette a punto un ‘metodo storico’ che, partendo dal recupero dell’*arte del costruire* che aveva caratterizzato la storia dell’architettura, pre-rivoluzione industriale, e basandosi sulla conoscenza storico-tecnica completa delle architetture e centri storici, interviene migliorando la qualità delle murature e lavorando sulle capacità di connessione tra le parti, determinate numericamente con l’analisi meccanica, al fine di prevedere le eventuali sconessioni che il sisma può provocare<sup>4</sup>.

Il loro operato, sicuramente più positivo rispetto agli interventi pesanti degli anni ‘80, così come confermato dalla ‘verifica del tempo’, cioè dalla durata degli uni e degli altri interventi, ha avuto il merito oltretutto di contribuire ad avviare una ricerca storiografica, su interventi condotti nella storia, più mirata alla conoscenza del cantiere e delle tecniche costruttive poste in essere soprattutto in relazione ai tanti sismi che dal Settecento in poi si sono verificati su tutto il territorio italiano ed ha indotto, nella sua ansia ‘correttiva’ (spesso esercitata con processi di smontaggio e rimontaggio) a proporre dei restauri come ‘fisiologici ripristini’<sup>5</sup>.

Oggi, nel rinnovato clima socio-culturale che stiamo vivendo, abbandonate le estreme posizioni ideologiche, tra tecniche tradizionali e moderne, occorre semmai accertare con equilibrio

<sup>4</sup> Entrambi hanno operato professionalmente e si sono impegnati in attività formativa-conoscitiva a largo raggio, attraverso la produzione di *Manuali del Recupero*, il primo, (Città di Castello, Roma, Palermo) e di *Codici di pratica*, il secondo (Città di Castello, Matera, Ortigia, Palermo); e nella fondazione nel 1993 di un’Associazione *Arco* ispirata ai nuovi principi.

<sup>5</sup> G. Carbonara, *Recensione a A. Giuffrè, Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro saggi 1985-97*, Roma, 2010, in «Palladio», 48, lug-dic. 2011, pp. 142-146.

e di volta in volta, la capacità dell'una o dell'altra di soddisfare i requisiti di efficacia e di quota conservativa che il consolidamento deve assicurare<sup>6</sup>.

Il problema più urgente è ancora, a mio parere, invece quello di riportare il consolidamento nell'alveo delle discipline della conservazione considerandolo parte essenziale del progetto di restauro, da condurre univocamente e non in quel dualismo di saperi ancora esistenti, e spesso conflittuali, tra architetti e ingegneri (in campo formativo) e, soprattutto, nel campo della tutela, tra Soprintendenze e Genio Civile e Protezione Civile<sup>7</sup>.

Ciò è ancora visibile nella valutazione di tanti progetti di restauro post-sismico di edifici tutelati presentati alle soprintendenze dopo gli ultimi tragici eventi, quasi interamente firmati da strutturisti, con la quasi totale assenza di "restauratori", grazie alla famosa legge del 1925 che consente anche ai non architetti di intervenire sugli aspetti "tecnici" del restauro. Evidentemente il recupero di manufatti storici danneggiati dal sisma è considerato un problema essenzialmente "tecnico", nel quale agli storici e ai restauratori è consentito, al massimo, un ruolo di indirizzo, nonostante che nel Codice dei Beni Culturali sia esplicitato che il consolidamento sismico faccia parte delle attività di restauro.

Necessita allora, assolutamente:

- a) portare avanti il progetto di restauro nella sua progressione metodologica così come, ormai da tempo, è stato messo a fuoco dai corsi universitari;
- b) curare i risvolti operativi delle scelte tecniche con un'aggiornata concezione critico-conservativa del restauro, così come definita all'inizio del presente saggio;
- c) lavorare sulla prevenzione, soprattutto sui tessuti edilizi storici.

Per quanto riguarda il primo punto, è da evidenziare il recepimento integrale di tale iter all'interno delle vigenti "**Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni**" (14 gennaio 2008 – Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici con la relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009, Istruzioni, vigenti dal luglio 2009), a cui si è pervenuti con il lungo e paziente lavoro compiuto a partire dalle Raccomandazioni del 1987 e concluso con le Linee-Guida (v. Sinossi), che definiscono il percorso della conoscenza.

Identificazione della costruzione
Caratterizzazione funzionale dell'edificio e dei suoi spazi
Rilievo geometrico
Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti
Il rilievo materico-costruttivo e lo stato di conservazione
La caratterizzazione meccanica dei materiali <sup>8</sup>
Aspetti geotecnici
Monitoraggio

<sup>6</sup> Cfr. il prezioso convegno tenutosi a Napoli nel 2003 A. Aveta, S. Casiello, F. La Regina, R. Picone (a cura di), *Restauro e consolidamento*, Napoli, 2005, e la successiva sintesi di A. Aveta, *Interazioni materiche fra teoria e prassi nel restauro strutturale*, in A. Ferlenga, E. Vassallo, F. Schellino (a cura di), *Antico e nuovo. Architetture e architettura*, Venezia, 2007, pp. 669-679.

<sup>7</sup> S. Boscarino, *Il restauro tra scienza e tecnica*, in «Progettare», 2, marzo 1985, pp. 95-98.

<sup>8</sup> È auspicabile che gli enti territoriali di tutela e controllo istituiscano degli archivi permanenti contenenti:

- a) almanacchi delle diverse tipologie murarie presenti, nel corso del tempo, nell'area in esame.
- b) tabelle con valori di riferimento delle proprietà meccaniche, desunti da sperimentazioni organizzate dagli stessi enti e/o utilizzando campagne seguite per singoli interventi e studi.

Da mettere a confronto con l'iter metodologico delineato nella formazione.



**Figura 2.** *Iter metodologico.*

Nelle Linee Guida del 2008 per la tutela del patrimonio storico del sisma, si ribadisce che il consolidamento sismico fa parte del “restauro”, che è analisi storica, e che le modellazioni numeriche degli edifici storici devono dialogare con la comprensione del comportamento locale di singoli “macroelementi” (leggi elementi costruttivi come muri, archi, cupole, ecc.) e con la conoscenza empirica delle costruzioni e delle relative patologie.

### Proposte

Per recuperare il ruolo operativo che ritengo spetti ai “restauratori”, può essere utile ricordare Gustavo Giovannoni e la Facoltà di Architettura di Roma fondata proprio a partire dal Restauro, in cui, tra le discipline identitarie, era senz’altro la materia *Caratteri costruttivi dell’architettura storica*. Essa comprende la conoscenza dei materiali attraverso le loro caratteristiche storiche e meccaniche, degli elementi costruttivi attraverso le problematiche di realizzazione, di funzionalità e di stabilità, dell’organizzazione costruttiva delle fabbriche e della gerarchia degli elementi costruttivi e strutturali. In sintesi la conoscenza di come sono costruiti gli edifici storici.

Certamente non conoscere i caratteri costruttivi, le caratteristiche dei materiali tradizionali e la stabilità delle strutture storiche porta all’uso obbligato di materiali e tecniche contemporanee, nella quale, appunto, i “tecnici” sono maestri.

Oggi sono molti i corsi di laurea in Architettura nei quali la disciplina dei *Caratteri Costruttivi* non è insegnata in modo adeguato; è stato detto che l'ostracismo verso tale disciplina, avvenuto nei decenni passati, sia derivato dalla volontà di esorcizzare ogni possibile "ricostruzione com'era": però ciò ha prodotto, insieme ai positivi risultati teorici della valorizzazione della conservazione, un depauperamento delle conoscenze caratteristiche dei restauratori e una perdita oggettiva di identità e di peso operativo, oltretutto lasciando libero campo a tutti coloro che, ignoranti delle tecniche del costruire storico, si sono sentiti autorizzati a fare liberamente i loro progetti sull'esistente, usato come oggetto d'antiquariato all'interno di un progetto contemporaneo – architettonico, strutturale o impiantistico<sup>9</sup>.

La presente pubblicazione nasce proprio da una precisa volontà di proporre una lettura integrata del tema, a partire dal coordinamento delle competenze tecnologiche, strutturali e di restauro, messe in opera e sperimentate in lunghi anni di attività didattica (v. Figure 3 e 4)<sup>10</sup>.

La comprensione storica delle fasi modificative subite dall'edificio, se condotta in maniera concreta attraverso l'incrocio dei dati derivanti dalla ricerca storica, da un approfondito rilievo architettonico-costruttivo e con l'ausilio di una diagnostica mirata, da rappresentare nella restituzione del rilievo stesso, redigendo la *Carta delle stratificazioni storiche*, aiuta ad entrare dentro l'organizzazione costruttiva dell'edificio e a ideare scelte minime di intervento che possono rientrare nella 'processualità' dell'architettura stessa, evitando traumi ad uno 'stato di equilibrio' comunque assestatosi nel tempo. L'uso prevalente di tecniche e materiali tradizionali può risultare vincente, rispetto a logiche nuove, con il duplice risultato di non far disperdere un patrimonio storico-costruttivo, che abbiamo perso con l'avvento del cemento armato, e di non risultare comunque falsante se messe in opera con modalità attuali e innovative quali quelle che ampiamente sono descritte nei capitoli di Liborio e Teotista Panzeca.

La conoscenza delle tecniche tradizionali si sta recuperando lentamente a partire dalla conversione mentale operata dalla cultura degli anni '80, e in particolare dal citato Documento CNR del 1987, grazie ad un vasto impegno storiografico condotto prevalentemente dagli storici dell'architettura e dai restauratori e di cui, per quanto riguarda la Sicilia, si rimanda alla Bibliografia. Tale 'casistica storica': speroni, controfacciate murarie, sottomurazioni, cerchiature (Figure da 5 a 9), catene (v. infra Piera Di Franco), deve far parte del bagaglio culturale dell'architetto, naturalmente verificata e vagliata criticamente all'interno della conoscenza dei singoli casi da affrontare.

E, soprattutto, lo si ribadisce, deve essere inserita in un progetto integrale di restauro come progetto di architettura che ne 'verifichi' l'impiego dimensionale e/o quantitativo, e la 'resa estetica' nell'intera architettura, perché anche la stessa scelta, se valida per moderati interventi potrebbe risultare invasiva, nel caso di più massicce dimensioni. Tutto questo, lo si ribadisce,

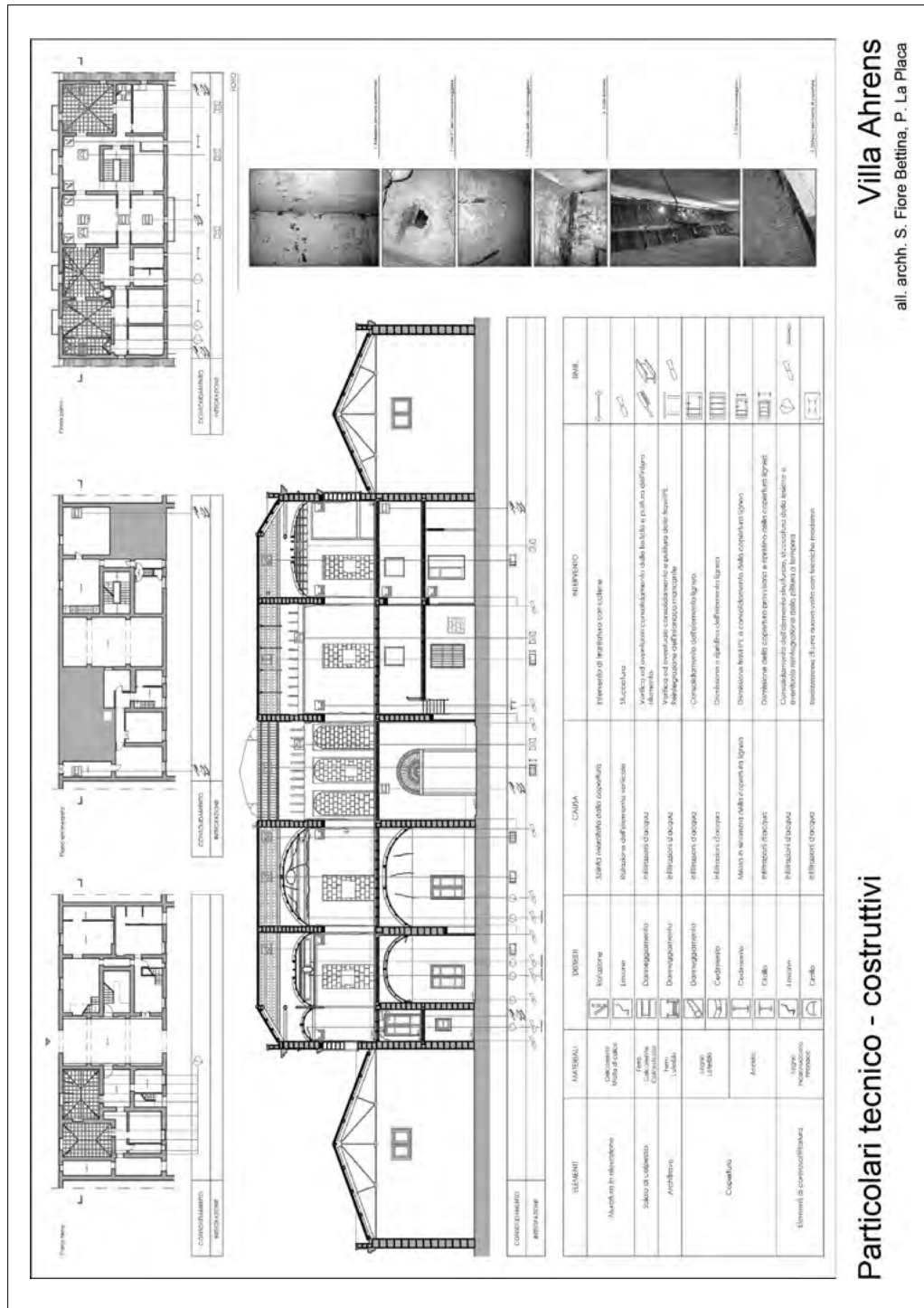
<sup>9</sup> Per queste riflessioni si è utilizzato una riflessione del prof. Carlo Blasi, ordinario di Restauro dei monumenti a Parma, in seno ad un dibattito scaturito all'interno della nascente SIRA, l'Associazione Nazionale dei professori di Restauro, costituitasi nel febbraio 2014. V. inoltre V. Pracchi, *L'insegnamento delle tecniche costruttive storiche*, in C. Varagnoli (a cura di), *Muri parlanti*, Firenze, 2009, pp. 55-68.

<sup>10</sup> Questa posizione è quella perseguita da anni dal mio Laboratorio di restauro dei monumenti tenuto presso il CdL in Architettura dell'Università di Palermo e che sempre si è avvalso della collaborazione, prima come Modulo dichiarato, poi in maniera spontanea, del prof. Tito Panzeca, proprio al fine di sviluppare un progetto di restauro concorde e consapevole con i temi strutturali. La collaborazione con la Prof.ssa Antonella Mami ha avuto modo di svilupparsi in parecchie tesi di laurea e nella conduzione, parallelamente al Laboratorio di Restauro del V anno, della materia opzionale di *Tecnologie del recupero edilizio*.









Villa Ahrens  
all. arch. S. Fiore Bettina, P. La Piaca

Particolari tecnico - costruttivi

Figura 4. Villa Ahrens, quadri fessurativi.

nella concezione di un progetto di restauro come progetto di architettura, che soddisfi le tre componenti della *firmitas, utilitas e venustas*.

Ciò vale anche per la dialettica visibilità/invisibilità per la quale si opta per un prevalente ricorso alla prima, con il duplice risultato di essere più rispettosa della autenticità materica esistente, più reversibile e facilmente ispezionabile. D'altronde la cultura estetica contemporanea ritengo sia profondamente mutata, contribuendo ad attutire quel 'disturbo' che prima si avvertiva, per una concezione ancora puro-visibilistica, rispetto alle parti tecniche e agli elementi che servono per la funzionalità (consolidamenti e impiantistica innanzitutto) dell'architettura. La svolta della 'cultura materiale' è ormai datata<sup>11</sup>.

Ultima riflessione, ma non ultima, è l'appello all'equilibrio e al buon senso per ogni scelta che, lo ricordiamo e questa è una delle differenze con il progetto del nuovo, nel rispetto del 'minimo intervento', è sempre al servizio della preesistenza e non dovrebbe essere conclamata assurgendo quasi a scelta creativa, magari soverchiante la fruizione estetica del monumento nel suo intero.

La creatività dovrebbe sussistere nel restauro innanzitutto nel dettaglio e, parlando di tecniche di consolidamento, essa si può inverare nella realizzazione della tecnica tradizionale con progettualità nuova<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> R. Boucaille, J.M. Pesez, Voce *Cultura materiale*, in Enciclopedia Einaudi, vol. 4, 1978, pp. 271-305.

<sup>12</sup> Il presente testo costituisce la rielaborazione dei testi per i seminari organizzati dall'Ordine degli architetti di Palermo nelle giornate del 24 ottobre 2014 e del 13 maggio 2015.



**Figura 5 (sinistra).** Parete di rafforzamento strutturale intorno all'arco, che oblitera anche le paraste laterali nel Palazzo Forcella-De Seta a Palermo.

**Figura 6 (destra).** Sottomurazione e rafforzamento cantonale 'a scarpa' nel Palazzo Chiaramonte a Palermo, operato da Giacomo Amato dopo il sisma del 1726.



**Figura 7.** Contrafforti posti in opera nella chiesa dei SS. Quaranta Martiri alla Guilla a Palermo dopo il sisma del 1726.



**Figura 8.** *Speroni addossati per evitare il ribaltamento, durante i restauri di inizio secolo di Francesco Valenti alla chiesa normanna dell'Uscibene a Palermo.*



**Figura 9.** *Sottoarchi e rinforzo dei pilastri in mattoni apposti per sopportare il carico soprastante dopo il sisma del 1823 a Palermo nel Convento di S. Francesco d'Assisi.*



## STRUTTURE DI SOSTEGNO: FONDAZIONI

Lo studio delle fondazioni di una costruzione in muratura è assai complesso perché va analizzato contestualmente alle caratteristiche meccaniche e morfologiche del terreno di sedime e, quindi, in stretta relazione con la figura del geotecnico.

Nella tradizione le fondazioni delle costruzioni murarie sono realizzate introducendo pietrame informe di grossa pezzatura, con malta di calce di scarsa qualità, e spesso in piccole quantità, in uno scavo a sezione obbligata realizzato allo scopo. La profondità dello scavo è stata relazionata allo stato di consistenza del terreno su cui poggiare la base fondale.

### 1.1. Cedimento della base fondale

Durante la vita della costruzione il terreno subisce modifiche, anche periodiche, dello stato di consistenza, quindi della sua portanza, dovute in genere al contenuto d'acqua, alla presenza di falde vicine, ad eventuali aggiunte o soppressioni di costruzioni confinanti, mentre la costruzione subisce una diversa distribuzione dei carichi per effetto di una nuova destinazione d'uso o per modifiche apportate al sistema murario. Come conseguenza il terreno è sottoposto ad un cambio continuo di deformazione con la nascita di cedimenti differenziati, con conseguente variazione dello stato di sofferenza della fondazione e quindi della struttura.

Se le variazioni della deformazione del terreno sono modeste, la costruzione non subisce alcun effetto significativo. Viceversa, nel caso di cedimenti del terreno di una certa entità, nella costruzione oltre allo stato di sforzo, dovuto alla presenza dei carichi esistenti, si aggiunge uno stato di sforzo conseguente al cedimento differenziato del terreno di fondazione. L'entità dello stato di sforzo aggiuntivo dipende dall'entità del cedimento differenziato del terreno di sedime.

In aggiunta, una possibile causa che determina condizioni di instabilità per cedimento delle fondazioni è la mancata regolamentazione delle acque meteoriche, sia quelle superficiali sia quelle provenienti dalle coperture. L'allontanamento delle acque meteoriche dal tetto della costruzione è condizione di fondamentale importanza per la salvaguardia della stabilità delle costruzioni. Molto spesso le acque meteoriche sono convogliate in condotte interrato per una migliore fruizione degli spazi esterni, ma il mancato funzionamento delle tubazioni interrato determina infiltrazioni nel terreno che, se trascurate, con il passare degli anni modificano lo stato di consistenza del terreno di sedime. Tale fenomeno, in quanto latente, viene molto spesso sottovalutato dagli addetti ai lavori e risulta pericoloso per la costruzione. Si consiglia quindi un allontanamento delle acque possibilmente a vista in modo così da eliminare questa potenziale causa di dissesto per la costruzione.

La valutazione dei fenomeni di dissesto, subiti dalla costruzione ed individuabili attraverso le fessurazioni, può essere effettuata con la introduzione di biffe di vetro o di gesso ovvero di fessurimetri a lettura manuale con retino o digitali, e di questi strumenti di controllo si riferisce nel successivo capitolo sulle murature.

Prima di procedere nel mostrare i tipi di interventi possibili, è necessario precisare che un intervento non è sempre risolutivo: infatti, se eseguito su una parte della fondazione, può raggiungersi la stabilità nella zona di intervento, mentre nella restante parte della fondazione possono verificarsi ulteriori cedimenti, tali da creare nella costruzione un quadro di fessurazioni aggiuntivo rispetto al precedente e tipologicamente diverso.

La soluzione ottimale non è semplice. L'obiettivo è quello di ottenere in ogni tratto di fondazione un comportamento del terreno simile in termini di spostamenti verticali. Ciò si ottiene rendendo costante a tratti il rapporto tra la forza agente in fondazione e la rigidezza del terreno, cioè sia costante l'abbassamento  $\Delta l = P/k$ , dove  $k$  è la rigidezza del terreno nella zona dove agisce il carico  $P$ .

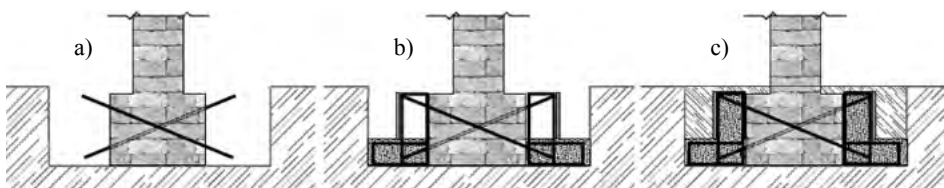
## 1.2. Allargamento della base fondale

Questo intervento, spesso usato, consiste in un allargamento della base fondale al fine di avere un piano di appoggio più esteso e quindi una distribuzione ridotta del carico sul terreno. L'allargamento della base fondale può avvenire sui due lati della fondazione ovvero da un solo lato, se l'altro lato è di difficile accesso.

### 1.2.1. Caso di accessibilità sui due lati

La successione delle lavorazioni, come mostrata in Figura 1.1, è la seguente:

- scavo da eseguire sui due lati della fondazione fino a raggiungere la base della fondazione esistente;
- esecuzione di fori, preferibilmente con inclinazioni diverse, all'interno della fondazione;
- introduzione di barre metalliche ed iniezione di boiaccia di cemento per operare una connessione efficace barra-pietrame (Figura 1.1a);
- predisposizione di staffe orizzontali e verticali, connesse con ferri longitudinali, da inserire sui due lati;
- primo getto di calcestruzzo fino a colmare la base delle travi (Figura 1.1b);
- successivo getto di calcestruzzo, preceduto dal posizionamento della necessaria carpenteria verticale (Figura 1.1c).

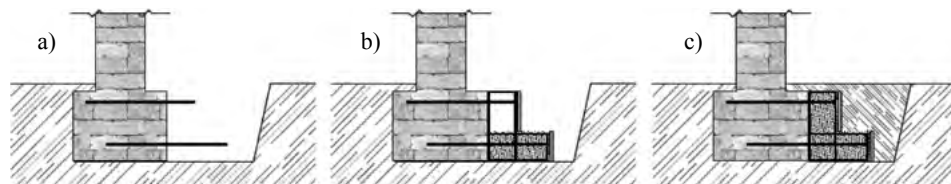


**Figura 1.1.** Successione delle fasi di lavorazione per allargamento della base fondale su due lati.

### 1.2.2. Caso di accessibilità su un solo lato

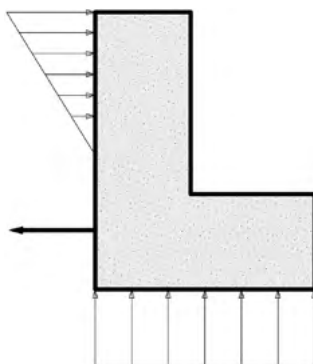
La successione delle lavorazioni, come mostrato in Figura 1.2, è simile alla precedente, ma in questo caso l'intervento è eseguito da un solo lato, in genere all'esterno della costruzione lungo la muratura di bordo.

In ambedue i casi è fondamentale che l'armatura metallica sia inserita nella fondazione in modo efficace, cioè la malta di cemento iniettata deve avvolgere la barra metallica.



**Figura 1.2.** Successione delle fasi di lavorazione per allargamento della base fondale su un solo lato.

Per i due casi esaminati le forze che garantiscono l'equilibrio delle travi di cls armato sono rappresentate indicativamente nella successiva Figura 1.3. Poiché il terreno di fondazione agisce con una distribuzione di carico diretto verso l'alto, la nuova fondazione può essere considerata come mensola vincolata alla parete della fondazione originaria. Quindi nella sezione di connessione con la parete della originaria trave di fondazione vi sarà una parte compressa, mentre le armature saranno sottoposte a trazione o a compressione in funzione della loro posizione.



**Figura 1.3.** Equilibrio del blocco fondale di cls.

Nella realtà, quando si realizza questo intervento, il carico presente sulla base della fondazione originaria rimarrà lo stesso, in quanto la nuova fondazione in cls non concorrerà ad assorbire parte del carico. La sua presenza risulterà efficace nel tempo, cioè quando l'originario sedime di fondazione subirà un abbassamento per le mutate condizioni del terreno fondale, o per crescita della deformabilità del terreno

$$c = \frac{1}{k},$$

o per crescita del carico  $P$  agente in fondazione.

Si può ovviare a questo problema iniettando sotto la nuova base della trave di cls una malta additivata espansiva, ma questa soluzione ovviamente deve essere effettuata con controlli tramite particolari sensori per valutare la tensione assunta sulla base di appoggio della trave di cls.

### 1.3. Interventi di sottomurazione

Un intervento più efficace consiste nell'effettuare una nuova fondazione ad una quota più bassa raggiungendo così un terreno con migliori caratteristiche fisico-meccaniche su cui poggiare la nuova fondazione. L'intervento viene definito di sottomurazione ed in genere interessa uno o più tratti di fondazione.



**Figura 1.4.** Lesioni sui prospetti causate da cedimenti fondali:  
a) zona centrale; b, d) cantonali; c) lungo tutta una parete.

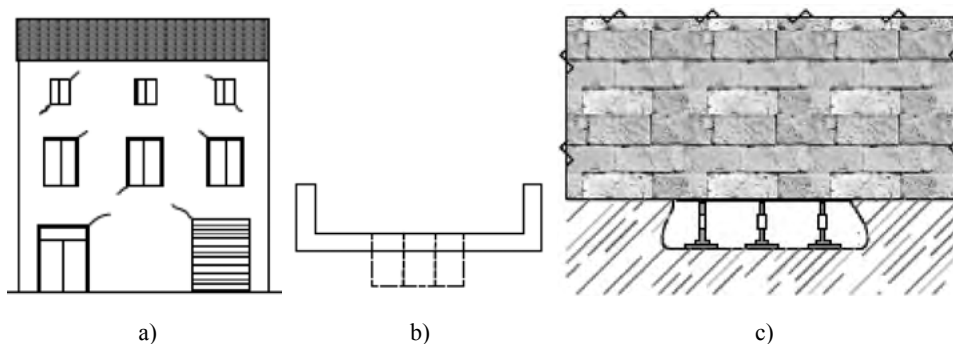
Si analizza la struttura in elevazione, osservando principalmente:

- la geometria delle lesioni con particolare attenzione all'orientamento della concavità, se presente;
- il fuori piombo dei pannelli murari, se presente;



- la eventuale perdita di orizzontalità dei solai utilizzando strumentazione da cantiere (livelle, tubi d'acqua, ...) come elemento di controllo, ma anche osservando il danneggiamento subito dai telai degli infissi interni ed esterni;
- la configurazione assunta dal terreno in prossimità della costruzione, osservando se si manifesta una riduzione della capacità di contenimento del terreno adiacente.

Di seguito si procede con un esempio relativo ad un edificio in cui tutte le lesioni presenti nel prospetto mostrano chiaramente che la zona su cui intervenire è la parte centrale della fondazione (Figura 1.5), come peraltro è mostrato in Figura 1.4a. Infatti tutte le lesioni mostrano una concavità verso la zona centrale e ciò individua la parte del piano di fondazione che ha subito un cedimento. In Figura 1.5b è mostrata la zona di intervento suddivisa in tre parti, ciascuna delle quali rappresenta un cantiere. Infatti questo intervento è caratterizzato dalla necessità di lavorare in successione per piccoli tratti di fondazione.



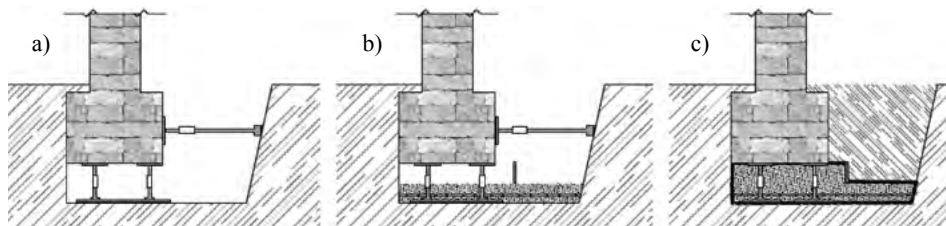
**Figura 1.5.** a) quadro fessurativo di un prospetto; b) intervento fondale suddiviso in tre cantieri; c) sottomurazione nel primo cantiere.

La successione della lavorazione è data da:

- 1) scavo da eseguire lungo il fronte di tutta la zona di intervento fino a raggiungere la quota che sarà il nuovo piano di sedime;
- 2) puntellamento orizzontale contro terra della zona di scavo (Figura 1.6a);
- 3) preconsolidamento della parete della fondazione con boiaccia di cemento, da eseguirsi durante la esecuzione dello scavo, nel caso in cui vi è carenza di malta tra le pietre della fondazione, al fine di operare in sicurezza;
- 4) suddivisione dell'intervento in più cantieri;
- 5) inizio dello svuotamento del terreno di sottofondazione, ad esempio nel cantiere centrale, e contestuale posizionamento di martinetti a perdere, in numero adeguato, su cui operare una compressione verso l'alto al fine di sostituire l'azione originaria che il terreno esercitava sulla base fondale (Figura 1.6a);
- 6) getto di uno strato di magrone;
- 7) posizionamento alla base dello scavo di griglia formata da tondini in fibre di vetroresina, di dimensioni appropriate, sufficientemente distanziate dal magrone;
- 8) primo getto di cls (Figura 1.6b) per tutta la larghezza dello scavo;
- 9) posizionamento di carpenteria verticale per consentire la seconda fase di getto;
- 10) secondo getto di cls (Figura 1.6c) con additivo antiritiro.

Si passa al secondo cantiere e si opera secondo la stessa sequenza.

Da osservare che la rete di barre di vetroresina deve consentire la continuità dell'armatura quando si opera negli altri cantieri.



**Figura 1.6.** a) scavo e puntellamento; b) primo getto di cls; c) secondo getto di cls con additivo antiritiro.

Il posizionamento dei puntelli deve essere adeguato: sotto le fondazioni deve essere collocato in modo da sorreggere le pietre più consistenti, sul terreno deve essere collocato un elemento piano (tavola, pietra) per una migliore distribuzione del carico.

Questo intervento è notevolmente più efficace rispetto al precedente per i seguenti motivi:

- risulta subito attivo per la presenza dei puntelli;
- permette di raggiungere un terreno più consistente;
- consente l'allargamento della base fondale;
- l'azione dei puntelli si trasferisce sul calcestruzzo, quando la presenza del puntello non è più efficace per la inevitabile ossidazione degli stessi puntelli.

Si può verificare il caso che la fondazione compia una rotazione nel piano di giacitura della sezione, evento molto raro. In tal caso si determina un movimento dei pannelli murari di perimetro verso l'esterno i cui effetti sono rappresentati dai possibili Modi di rottura in tutto simili a quelli che saranno analizzati nel successivo capitolo sulle murature.

#### 1.4. Intervento con pali di piccole dimensioni (pali radice)

I pali radice sono pali di piccolo diametro (cm 12-20) che vengono realizzati perforando le fondazioni e raggiungendo strati di terreno più consistente. L'intervento non comporta un immediato trasferimento del carico dalle fondazioni alle zone più resistenti del terreno ma, come nel caso di allargamento della base fondale, la loro presenza risulterà efficace quando l'originario piano di fondazione subirà un abbassamento per le mutate condizioni di carico o di deformazione del terreno di sedime originario (Figura 1.7).

Il carico della parete muraria si trasferisce sui pali radice solamente quando si verificherà un distacco del terreno di sedime dalla base della fondazione.

Vi sono molte tipologie di pali radice, ma quelli generalmente impiegati sono costituiti da tubazioni di ferro forate lungo la superficie cilindrica per consentire al cls, realizzato con pietrisco di limitate dimensioni, di uscire lateralmente dalla tubazione e costituire un elemento di tenuta attraverso la nascita di attrito laterale terreno-cls.

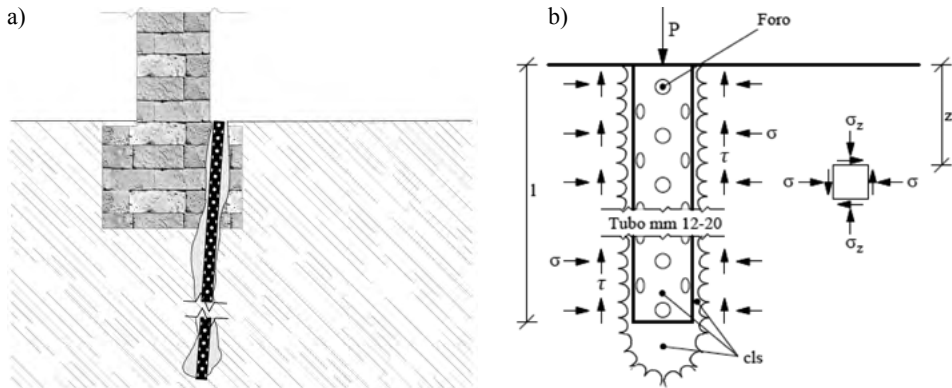


Figura 1.7. a) palo radice; b) schema rappresentativo delle azioni agenti sul palo.

Il numero dei pali, la loro posizione e profondità, dipendono dal carico che devono trasmettere e dalle caratteristiche meccaniche del terreno sottostante. Il loro orientamento (verticali o inclinati) invece dipende principalmente dalla geometria della fondazione e dal posizionamento della macchina di perforazione.

In alcuni casi, laddove è possibile, si interviene alternando pali radice dall'interno e dall'esterno.

Si vogliono dare alcune indicazioni su come effettuare la verifica dei pali radice. Ci si pone nel caso semplice di sola presenza dell'attrito laterale, trascurando il contributo della resistenza alla punta del palo.

È necessario conoscere le caratteristiche fisiche dei vari strati di attraversamento del palo, principalmente l'angolo di attrito  $\varphi'$ . A tal fine si devono prelevare campioni da sottoporre a prove di taglio di laboratorio, ovvero ci si deve affidare alla conoscenza dei terreni nella zona di intervento, utilizzando i valori dell'angolo di attrito riportati nei manuali specifici<sup>1</sup> o tramite ricerca via Internet. Ove possibile si deve tener conto della variazione della stratigrafia del terreno.

Nella ipotesi che la tensione verticale  $\sigma_z = \gamma z$  sia supposta variabile linearmente con la profondità  $z$ , la tensione agente normalmente alla superficie cilindrica risulterà:

$$\sigma = K_0 \gamma z$$

con  $K_0$  coefficiente di tensione orizzontale a riposo che dipende dalle caratteristiche del terreno e dalla storia delle azioni da questo subite. Il valore di tale coefficiente varia tra 0,5-3.

Conseguentemente, la distribuzione delle tensioni tangenziali ad esse associate per la legge di Coulomb risulta:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi' = K_0 \gamma z \operatorname{tg} \varphi'$$

In Figura 1.7b è mostrato lo schema del palo profondo  $l$  sottoposto al carico  $P$ , alla distribuzione di tensioni normali  $\sigma$  ed alla distribuzione delle tensioni tangenziali  $\tau$ .

<sup>1</sup> Nuovo Colombo, *Manuale dell'ingegnere*, ed. Hoepli, 2012.

L'impiego della condizione di equilibrio verticale scritta nella ipotesi di condizione di carico limite  $Q_{lim}$  dà luogo alla seguente equazione:

$$Q_{lim} = \int_0^{\ell} \tau \cdot (2\pi r) dz = \int_0^{\ell} (K_0 \gamma z \operatorname{tg} \varphi') \cdot (2\pi r) dz = K_0 \gamma \operatorname{tg} \varphi' \pi r \ell^2$$

dove, in base al D.M. 2008, la  $\operatorname{tg} \varphi'$  deve essere divisa per un coefficiente  $\gamma_M = 1,25$  come da Tab. 6.2.II.

Pertanto la equazione di equilibrio diventa:

$$Q_{lim} = K_0 \gamma \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_M} \pi r \ell^2$$

Se si ipotizza che:

$K_0 = 1$ , cioè che la tensione normale  $\sigma$  alla superficie cilindrica sia eguale alla  $\sigma_z$ ;

$r = 0,06$  m, raggio del palo radice;

$\gamma = 1600$  daN/m<sup>3</sup>, peso specifico del terreno;

$\varphi' = 25^\circ$ , sabbia argillosa compatta,

si ottiene:

$$Q_{lim} = 112 \cdot \ell^2$$

In base al D.M. 2008 Cap. 6.4.3.1, per i pali trivellati, il coefficiente parziale di sicurezza allo Stato Ultimo varia tra  $\gamma_R = 1,0 - 1,45 - 1,15$  a seconda del tipo di combinazione di carico, pertanto si avrà che il peso P deve, in condizioni limite, rispettare la seguente equazione:

$$P = \frac{Q_{lim}}{\gamma_R}$$

da cui è possibile calcolare la lunghezza del palo, che risulta:

$$\ell^2 = \frac{\gamma_R P}{112}$$

Si rinvia a trattati specifici ed all'assistenza di geotecnici per rendere scientificamente più valide le scelte progettuali proposte.

Con questo tipo di intervento si connette in genere una parte di fondazione al terreno sottostante più resistente, impedendo qualsiasi movimento verticale, mentre la restante parte di fondazione, principalmente quella che sorregge i muri interni, su cui per ipotesi non si è intervenuto, continua a potere subire spostamenti verticali. Peraltro l'intervento non arresta eventuali movimenti orizzontali della fondazione da impedire con la introduzione di catene disposte ortogonalmente alla fondazione, sotto la pavimentazione. Tale soluzione impiegherà le stesse tecniche che saranno presentate nel successivo capitolo sulle murature.

Tutte queste considerazioni fanno comprendere la estrema delicatezza con cui si deve procedere nel progettare ed eseguire questo tipo di intervento.

### 1.5. Interventi con palificate

Vi è la possibilità di operare con una diversa strategia, in genere più costosa, consistente nell'uso di pali di grande diametro (cm 40-100) per creare una protezione, in genere posta ad una certa distanza dalle fondazioni, in presenza di un pendio e di smottamenti del terreno.

L'uso di tale strategia consente di impedire che movimenti franosi in atto o potenziali possano interessare la stabilità dell'intera costruzione. Ovviamente la potenzialità dell'innescarsi di una frana dipende principalmente dalla presenza di falde acquifere che corrono su strati di argilla nel terreno sottostante.

In tali casi la soluzione perseguita consiste nel realizzare un sistema di pali, eseguiti in genere con trivella, disposti in linea o sfalsati, collegati in testa da un cordolo rettilineo o curvo con la convessità rivolta verso monte al fine di costituire un sistema ad arco.

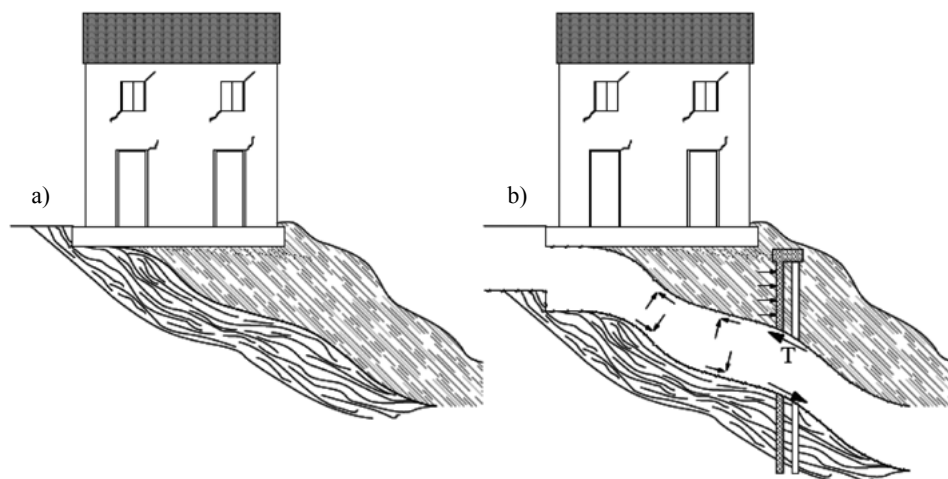


Figura 1.8. a) costruzione dissestata; b) intervento con pali sfalsati.

La strategia dell'intervento è quella di proteggere la costruzione da scoscendimenti e la palificata ha lo scopo di rallentare il fenomeno; infatti piccoli movimenti in genere continuano a manifestarsi, ma si riducono nel tempo fino ad esaurimento.

Dal punto di vista del dimensionamento di massima dei pali è necessario conoscere il piano di scorrimento individuabile nel passaggio tra il terreno poco consistente e non addensato e l'inizio della zona di argilla.

Si determina il peso  $P$  (costruzione + terreno) della zona soggetta ad un possibile movimento franoso, valutato secondo la componente normale al piano di scivolamento. La legge di Coulomb, nella ipotesi di trascurare la coesione, consente di ottenere la forza di scorrimento complessiva  $T = P \cos \beta \operatorname{tg} \varphi'$  agente sui pali. Pertanto, dalla verifica a taglio in prima approssimazione si può stabilire il numero dei pali  $n$  e la sezione  $A$  di ciascun palo.

Con  $\beta$  e  $\varphi'$  si sono indicati l'angolo del piano di scorrimento rispetto all'orizzontale ed l'angolo di attrito.

Per equilibrio allo stato limite ultimo di scivolamento che relaziona la forza di scorrimento e la resistenza al taglio-compressione  $V_{RC}$  riguardante il calcestruzzo d'anima della palificata,

in genere più penalizzante rispetto alla resistenza a taglio-trazione  $V_{RS}$  riguardante l'armatura trasversale, risulta:

$$T = V_{RC}$$

Per il calcestruzzo (cfr. eq. 4.1.19 del D.M. 2008 con  $\cot g \beta = 1$ ):

$$V_{RC} = n \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,9 A \frac{f_{cd}}{2} (1 + \cot g \alpha)$$

con:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,83 R_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{valore limite a compressione del calcestruzzo;}$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$\alpha$

coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo;  
inclinazione delle staffe elicoidali, in genere pari a  $5^\circ$ .

Assumendo:

$$R_{ck} = 250 \text{ daN/cm}^2$$

si ottiene:

$$V_{RC} = 386 n A$$

e quindi:

$$n A = \frac{T}{386}$$

Ovviamente la profondità  $\ell$  dei pali passa attraverso una verifica condotta sul sistema palo-terreno, il cui palo singolo è sottoposto al proprio peso ed alla forza tagliente  $t = \frac{T}{n}$  distribuita lungo tutto il palo a partire dalla sua estremità superiore fino alla superficie di scorrimento (Figura 1.8b).

Per tale verifica si rinvia a trattati specialistici, ricorrendo a programmi che tengono anche conto del problema di contatto-distacco del sistema palo-terreno.

Rimane però il passaggio dell'acqua sull'argilla e ciò produce:

- un trascinarsi delle particelle più piccole di terreno che attraversano la palificata con la conseguente formazione di vuoti sotto il piano fondale;
- un aumento ed una riduzione stagionale di volume non uniforme dell'argilla per assorbimento dell'acqua di filtrazione ed una conseguente variazione della sua capacità portante.

Se si tiene conto delle variazioni stagionali del contenuto d'acqua nel terreno, si comprende che l'intervento con palificata da sola non elimina del tutto il fenomeno della instabilità della costruzione, per cui occorre abbassare la falda acquifera, cioè il livello dell'acqua nel terreno.

Due sono le usuali strategie che sono impiegate e che consistono nella realizzazione a monte della costruzione di un drenaggio (barbacane) o di un sistema di pozzi drenanti.

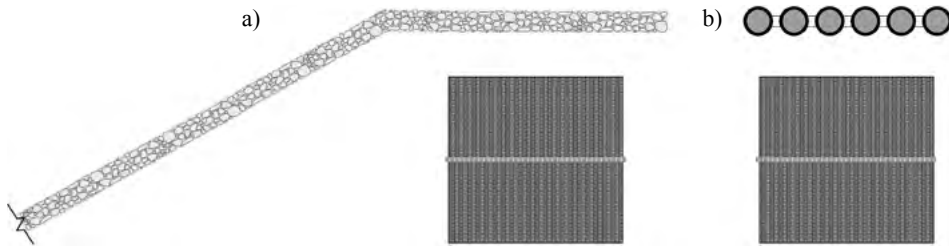
L'impiego del drenaggio (Figura 1.9a) è poco costoso e consiste nella realizzazione di uno scavo a sezione, profondo fino a raggiungere l'argilla, entro cui va inserito un tubo drenante che presenta dei fori lungo tutto il suo contorno. Sul tubo si dispone pietrame di pezzatura più grossa

e via via più piccola fino a riempire tutto lo scavo. Per questa lavorazione bisogna prestare attenzione ad alcuni aspetti:

- in assenza di base di terreno argilloso, si deve introdurre uno strato di bentonite (argilla) immettendo acqua durante la fase di collocazione e costipando il materiale al fine di rendere lo strato uniforme;
- la pendenza adeguata da dare alla base dello scavo;
- la necessità di dare la possibilità di smaltire l'acqua in un punto distante dalla costruzione.

L'inserimento della bentonite è di vitale importanza in quanto, essendo un materiale plastico, segue eventuali movimenti del terreno, senza creare soluzioni di continuità.

Bisogna peraltro osservare che una parte dell'acqua scorrerà dentro la tubazione, una parte nello scavo sull'argilla. Se la pendenza è adeguata, la presenza del tubo drenante può non essere necessaria.



**Figura 1.9.** Protezione della costruzione lato monte:  
a) a mezzo drenaggio; b) con pozzi drenanti.

L'impiego dei pozzi drenanti (Figura 1.9b) è molto più costoso e consiste nella realizzazione di pozzi a profondità adeguata, al di sotto del piano di scorrimento, collegati mutuamente al fine di consentire all'acqua di passare da un pozzo all'altro per potere essere estratta con l'impiego di una pompa sommersa. I pozzi hanno il vantaggio in quanto agiscono da pali a ridosso della costruzione, danno la possibilità di abbassare la falda freatica ed il loro funzionamento può essere controllato. Presenta lo svantaggio, oltre che del costo per la loro realizzazione, principalmente per l'energia da impiegare per il funzionamento e per la manutenzione della pompa.

Queste soluzioni sono usualmente assunte dai tecnici nella stragrande maggioranza dei casi, ma non sono le sole in quanto ne esistono altre, spesso legate a fenomeni franosi che interessano vaste zone dove ricade la costruzione. In questi casi è necessaria la collaborazione di professionalità specifiche del settore della geotecnica.

## CAPITOLO 2

**STRUTTURE VERTICALI: MURATURE**

Le costruzioni in muratura sono strutture continue, realizzate tramite l'assemblaggio di pannelli murari, mutuamente connessi, e tali da formare un insieme di sistemi scatolari. La regolarità di questo sistema dipende da tanti fattori tra cui la geometria dell'area su cui la costruzione insiste, le esigenze funzionali, nonché la tipologia degli elementi costruttivi.

La costruzione si distingue in sistemi costruttivi ad impalcato rigido (solai in c.a., o con puelle, laterizi e cappa, ...) e sistemi ad impalcato deformabile (solai con travi di legno, tavolato e greonato o con cappa in cls di piccolo spessore. Nel caso di impalcato rigido, l'analisi in presenza di sisma deve essere condotta attraverso una distribuzione delle forze sismiche che tengano conto della differente posizione del baricentro delle masse rispetto al baricentro delle rigidità dei pannelli. Viceversa, nel caso di impalcato deformabile, la verifica sismica deve essere condotta separatamente su ciascun pannello.

Si rappresentano le cause più rilevanti che caratterizzano la vulnerabilità di una costruzione muraria, sia che trattasi di un bene monumentale che di una costruzione dell'edilizia minore realizzata con tecniche tradizionali.

Tra le principali cause si citano:

- Azione sismica per forze agenti fuori dal piano e per forze agenti in piano;
- Cedimenti differenziati delle fondazioni per differente deformabilità del terreno di sedime o per mancata stabilità del substrato, o ancora per la presenza di cavità;
- Azione antropica:
  - abbandono della fabbrica con conseguente mancata regolamentazione del deflusso delle acque meteoriche;
  - consolidamento peggiorativo della costruzione, spesso con aumento dei pesi;
  - modifica della struttura per una diversa fruizione, con soppressione anche parziale di elementi portanti;
- Instabilità per carico di punta.

Si tralasciano i danni causati dalle azioni antropiche, che meriterebbero una trattazione molto vasta e variegata, e quelli meno frequenti della instabilità per carico di punta, mentre sono analizzati in questo capitolo gli effetti ed i rimedi in presenza di azioni sismiche.

In ogni caso è necessario fare ricorso all'evolversi del quadro fessurativo, indispensabile per verificare sia le condizioni statiche in cui si trova la costruzione sia l'evoluzione del fenomeno di dissesto. Gli elementi di controllo che misurano l'evolversi del quadro fessurativo si distinguono in tradizionali e di nuova concezione.

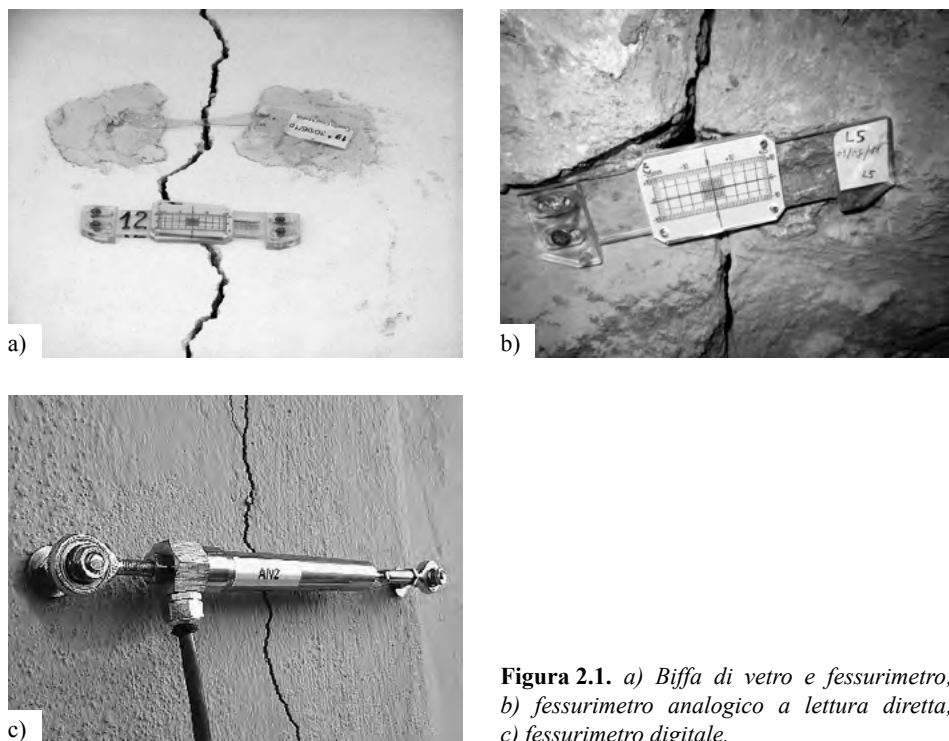
Le biffe di vetro (Figura 2.1a) o di gesso a forma di doppia coda di rondine consentono di segnalare la presenza di un fenomeno in atto: infatti nelle biffe di vetro si verifica una rottura del vetro, nelle biffe di gesso si nota una discontinuità del gesso attraverso il nascere di una sottile linea di frattura.



I fessurimetri analogici con lettura a retino, di concezione più moderna, sono formati da due lastre di materiale plastico sovrapposte, ciascuna di esse da connettere saldamente con tasselli chimici, resine o tasselli meccanici ai lati della fessura. In una lastra è rappresentato un reticolo bidimensionale con un sistema di assi ortogonali, nell'altra solamente un sistema di assi ortogonali. L'entità dello spostamento relativo è mostrato dalla posizione assunta dalle origini dei due sistemi di assi (Figura 2.1a,b).

I fessurimetri elettronici a lettura digitale a distanza su display consentono di conoscere lo spostamento relativo attraverso un sensore elettrico che misura gli spostamenti dei lati della fessura nella direzione dell'asse dello strumento (Figura 2.1c).

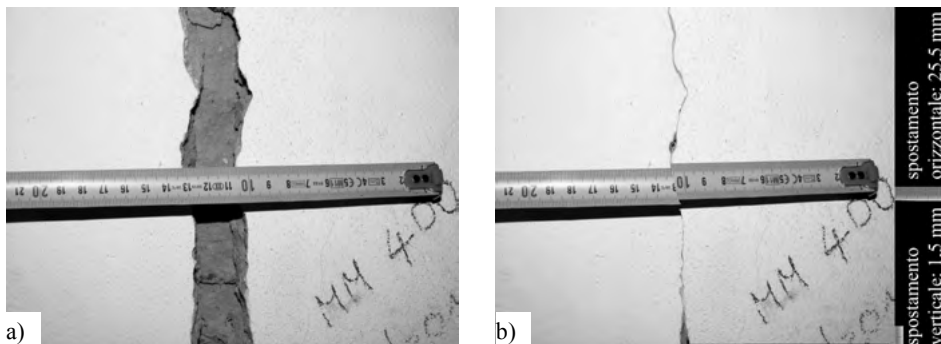
Esistono sistemi di misura con l'uso di fessurimetri digitali nella versione tri-direzionale con una squadra di riscontro formata da un cubo.



**Figura 2.1.** a) Biffa di vetro e fessurimetro; b) fessurimetro analogico a lettura diretta; c) fessurimetro digitale.

Queste tipologie di controllo consentono di avere informazioni sul progredire delle lesioni, ma non consentono di conoscere il valore dello spostamento relativo fin dal suo nascere. A tal fine o si utilizza un Laser Scanner a misurazione diretta o si usa una strategia più economica e nel contempo più semplice. Allo scopo si effettui una o più foto ravvicinate ed eseguite in asse in presenza di un metro rigido e, attraverso l'impiego di tecniche di rappresentazione si muova uno dei due fronti, ripristinando così la continuità della parete. La riuscita di tale operazione consente di valutare l'entità dello spostamento e la sua direzione nonché una eventuale rotazione tra i lembi. Sembra una modalità di valutazione grossolana, ma in genere si ottiene

una informazione molto significativa. In Figura 2.2 sono mostrate la foto della lesione e la foto del paramento murario ripristinato attraverso cui si può dedurre lo spostamento ottenuto con la modalità su esposta.



**Figura 2.2.** *Cattedrale di Agrigento, prospetto interno della facciata:*  
a) lesione; b) sovrapposizione dei lembi.

Quando i sistemi di controllo delle lesioni mostrano valori tali da temere pericoli per la staticità della costruzione, risulta essenziale intervenire nella costruzione: nelle fondazioni, se la causa dipende da un cedimento differenziato del sedime (Capitolo 1), ovvero nella struttura muraria ripristinando la scolarità perduta.

### 2.1. Meccanismi di rottura

Al fine di intervenire sulle costruzioni in muratura occorre premettere che una costruzione soggetta a sisma è sottoposta:

- nei piani più alti a grandi spostamenti che possono essere disuniformi e tali da provocare discontinuità tra le pareti ed all'interno di ciascuna parete;
- nei piani bassi ad uno stato di sforzo disuniforme per la presenza di una coppia flettente, che può creare un eccesso di carico ed, allo stesso tempo, decoesione (distacco tra il pietrame ed il legante) nella muratura.

Inoltre occorre distinguere le costruzioni ad impalcato rigido da quelle ad impalcato deformabile, anche se spesso in ambedue i casi la copertura spesso è realizzata con impalcato deformabile.

La verifica di stabilità deve essere eseguita nei confronti delle azioni sismiche, sia per quelle agenti fuori dal piano che per quelle agenti in piano. Ci si limita in questa fase ad analizzare i Modi di rottura possibili dei pannelli murari soggetti ad azioni fuori piano, riservandosi successivamente di analizzare gli effetti delle azioni agenti in piano (v. paragrafo 2.3).

### 2.2. Meccanismi di rottura in presenza di forze agenti fuori piano

Tali azioni devono essere considerate come principale causa del crollo, anche parziale, delle costruzioni murarie, addirittura superiore come pericolosità a quella causata da forze agenti nel piano.

Tale osservazione nasce da un semplice esame degli effetti degli eventi sismici sulle costruzioni murarie in occasione dei terremoti.

Infatti si riscontra che, in funzione della intensità della forza d'inerzia distribuita su ciascun pannello in direzione ortogonale, si può verificare che:

- un pannello murario di facciata si trovi in uno stato incipiente di collasso ovvero ribaltato verso l'esterno;
- tutta la costruzione subisce un crollo, in genere preceduto dal ribaltamento verso l'esterno del pannello di facciata, seguito dalla rottura dei pannelli murari soggetti a forze agenti in piano.

I Modi di rottura possibili (Figura 2.3) dei pannelli murari soggetti ad azioni fuori piano possono essere distinti nel modo seguente:

- *Modo I: Meccanismo di facciata:* consiste nell'attivazione di un moto rigido che coinvolge uno o più pannelli murari di facciata dell'ultimo o degli ultimi piani della costruzione.
- *Modo II: Meccanismo di parete per flessione:* in presenza di una parete estesa, è possibile un cambio di configurazione assimilabile ad una catenaria seguito dal crollo della zona centrale della parete a forma di V.
- *Modo III: Meccanismo di parete per taglio:* è assimilabile al Modo I, ma il moto rigido della parete non coinvolge nel crollo i cantonali.

Durante un evento sismico i Modi di rottura possono manifestarsi contemporaneamente dando luogo a Modi composti.

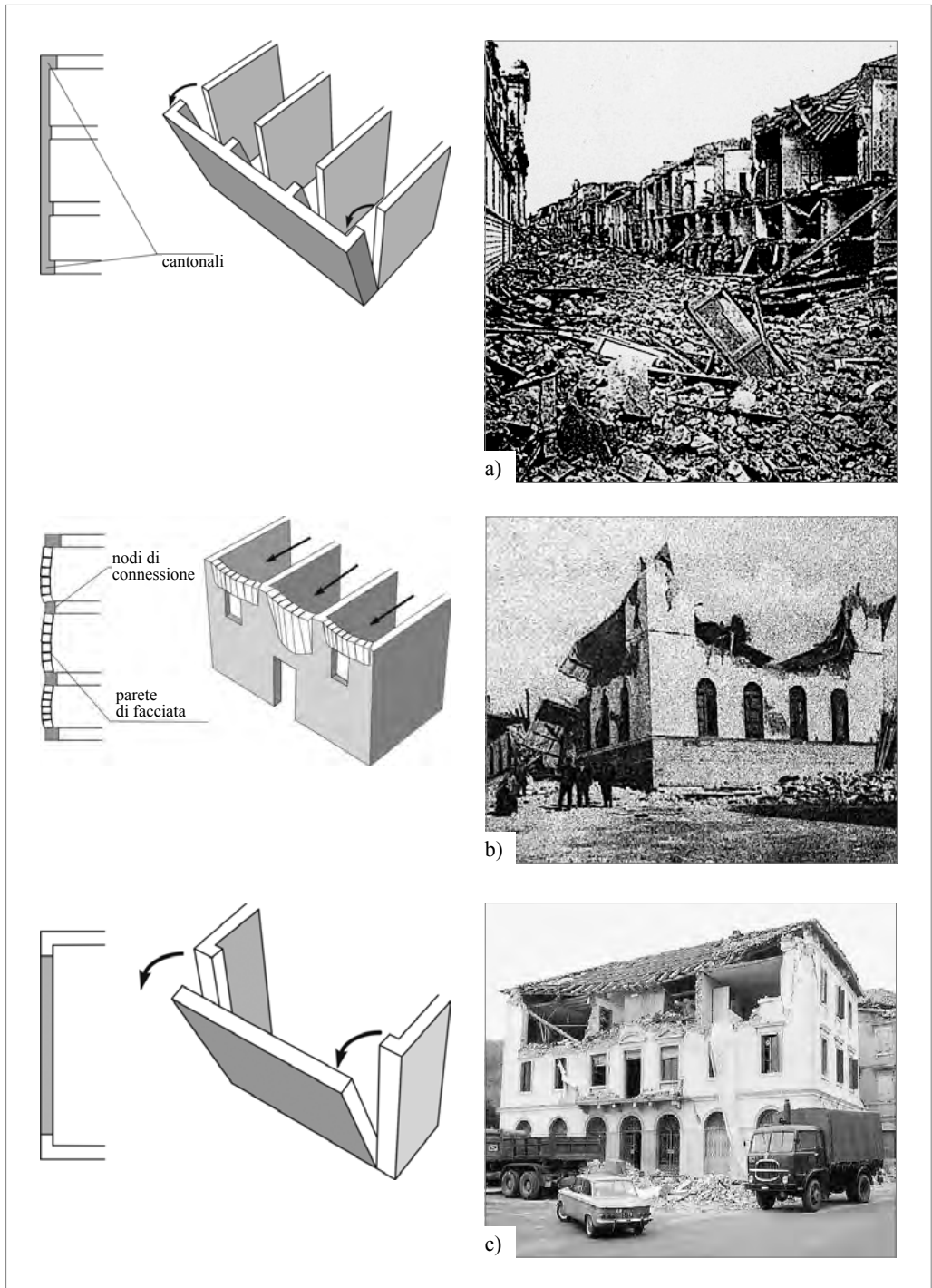
### 2.2.1. Interventi per la messa in sicurezza, in presenza di forze agenti fuori piano

Quando il fenomeno sismico si manifesta, le pareti possono trovarsi in condizioni limiti di collasso ovvero crollate, come mostrato nelle immagini di Figura 2.3, pertanto gli interventi proposti si riferiscono al caso di pareti in condizioni limiti di collasso ovvero rappresentano soluzioni per le costruzioni con carattere di prevenzione, con lo scopo di rendere meno vulnerabile la costruzione soggetta ad azioni esterne. L'obiettivo è quello di migliorare la stabilità della costruzione, sia localmente che globalmente, secondo i dettami della Normativa che prevede, per il miglioramento e per la riparazione strutturale, che ad intervento effettuato la costruzione muraria possieda un grado di sicurezza più elevato.

La strategia consiste nel predisporre opportune barre metalliche o funi, comunemente denominate catene, nelle pareti murarie al fine di ottenere un adeguato contributo alla tenuta globale della costruzione e quindi di garantire per essa un grado di sicurezza più elevato.

L'impiego di catene dà la possibilità al progettista di volta in volta di procedere ad interventi di miglioramento e/o di riparazione, ma anche ad interventi di adeguamento, secondo la scelta progettuale ipotizzata. Ovviamente questa soluzione non esaurisce le possibili verifiche secondo Normativa, ma rappresenta una tipologia di intervento che certamente migliora le condizioni di sicurezza delle costruzioni murarie. L'inserimento delle catene (funi e/o barre), come elementi di connessione tra pannelli murari, risulta essenziale. Il loro impiego nasce per far fronte ai possibili meccanismi (Modi) di rottura dei pannelli murari di perimetro, che traducono il modo secondo cui si può manifestare la perdita della stabilità della costruzione.

La suddivisione e la sequenza dei Modi di rottura nasce da una logica che relaziona le azioni agenti sui pannelli e le potenziali modalità con cui avviene la perdita di stabilità.



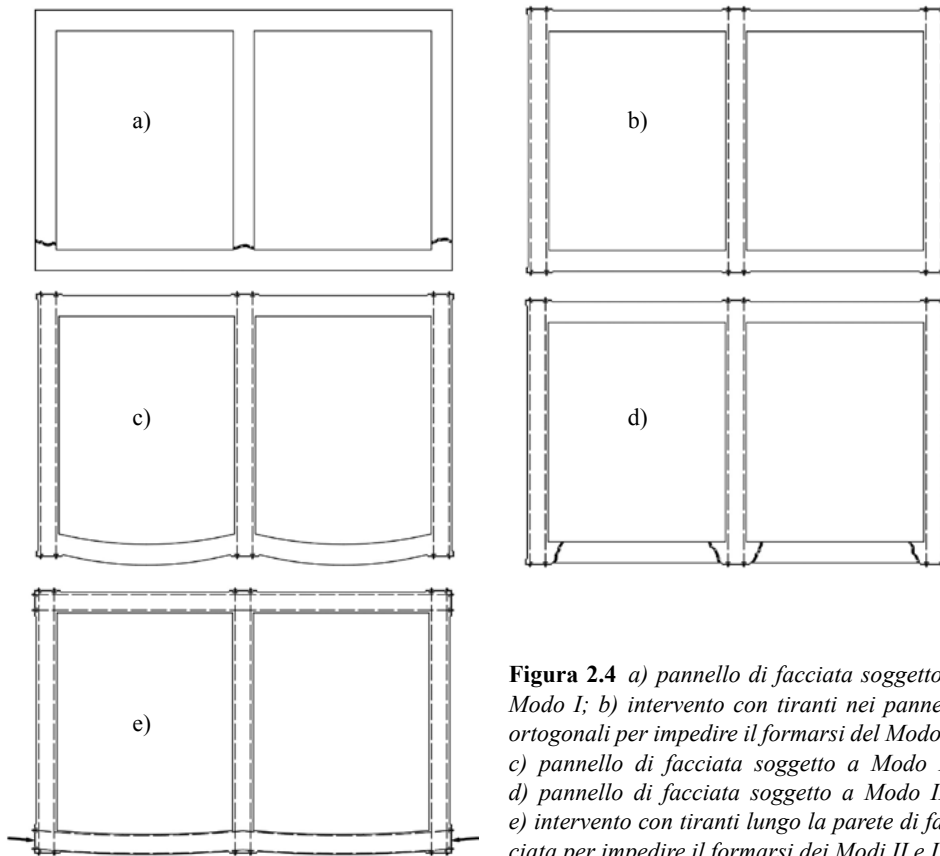
**Figura 2.3.** Modi di rottura: a) meccanismo di facciata; b) meccanismo di parete per flessione; c) meccanismo di parete per taglio.

Primariamente occorre impedire che le forze agenti fuori piano possano causare l'attivazione del Modo I, consistente in un moto rigido dei pannelli di facciata dell'ultimo o degli ultimi piani della costruzione. L'intervento consiste nell'inserire cavi metallici o barre lungo i muri ortogonali al muro di facciata e ciò comporta un efficace concatenamento tra muro di facciata ed i muri ad esso ortogonali (Figura 2.4a,b).

A causa di questa efficace connessione, la facciata può ancora attivare due possibili meccanismi, quello di un cambio di configurazione assimilabile ad una catenaria (Figura 2.4c), ovvero quello di un moto rigido della parete senza coinvolgere nel crollo i cantonali o le connessioni tra muri trasversali e muri di facciata (Figura 2.4d).

La introduzione delle catene lungo il muro di facciata impedisce l'attivazione del classico crollo a V, cioè l'innescarsi del Modo II (Figura 2.4e).

Allo stesso tempo i cavi, cambiando configurazione, si allungano e causano un aumento dello stato di tensione. Ciò determina (Figura 2.4e) un aumento della forza di compressione che la piastra eserciterà nella zona di contatto tra cantonale e muro di facciata, aumentando il valore dello sforzo di taglio limite in corrispondenza della connessione pannello di facciata-cantonale per la legge di Coulomb, accrescendo così la capacità di resistenza a taglio del pannello e quindi impedendo la possibilità di innesco del Modo III.



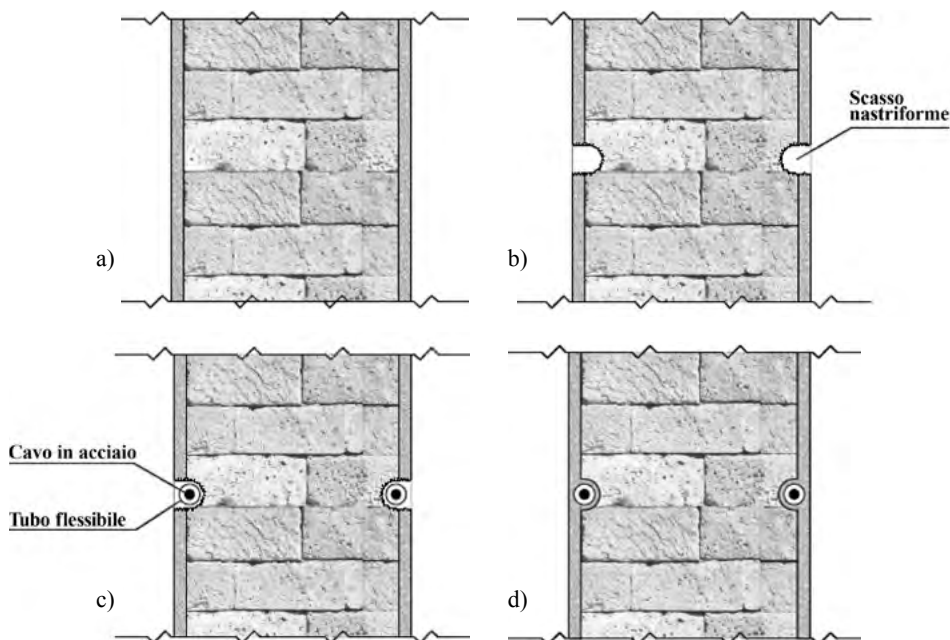
**Figura 2.4** a) pannello di facciata soggetto a Modo I; b) intervento con tiranti nei pannelli ortogonali per impedire il formarsi del Modo I; c) pannello di facciata soggetto a Modo II; d) pannello di facciata soggetto a Modo III; e) intervento con tiranti lungo la parete di facciata per impedire il formarsi dei Modi II e III.



Peraltro la configurazione deformata assunta dalla parete per innescarsi del Modo II si riduce per la presenza del cavo esterno che rappresenta quindi un elemento di tenuta.

Se tale strategia viene impiegata in modo sistematico, l'intera costruzione risulta più sicura in quanto i pannelli murari e le mutue connessioni garantiscono scolarità alla costruzione.

Nella Figura 2.5 sono date indicazioni sulla sequenza dell'intervento lungo le due facce (interna ed esterna) di ciascuna parete muraria, nel rispetto della minima invasività. La necessità di intervenire sulle due facce del pannello murario deriva dalla possibilità di potere introdurre una forza di coazione centrata, intervenendo su ambedue i cavi con la stesso valore di tirantatura.



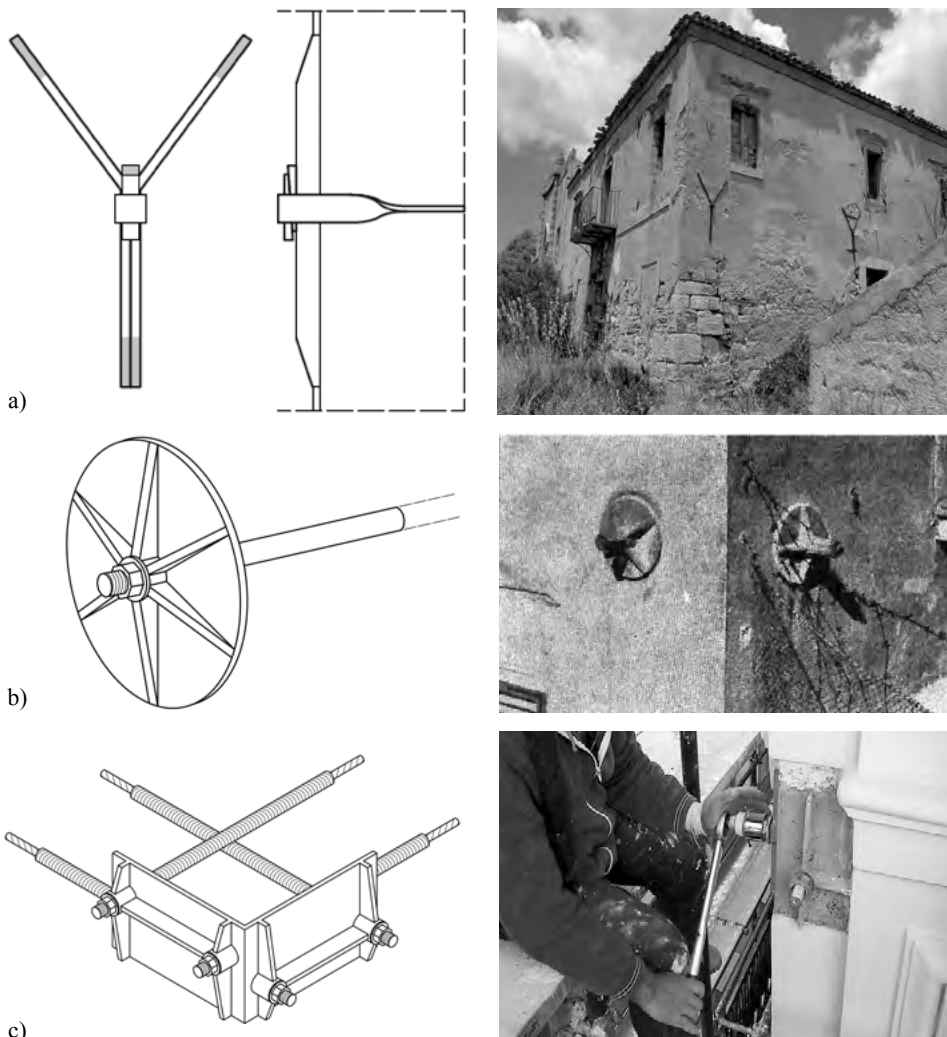
**Figura 2.5.** Sequenza dei lavori per l'inserimento dei cavi entro guaine: a) muro esistente; b) scasso nastriforme; c) introduzione di tubo flessibile e catena o barra di acciaio; d) lavorazione ultimata.

L'impiego di elementi metallici negli edifici, avente come finalità quella di assorbire le forze di trazione, è uno dei sistemi più antichi impiegati per sopperire alla incapacità della muratura a svolgere questo ruolo. Recentemente, sono state chiamate a svolgere questa finalità le catene (funi o corde) di acciaio sia per la loro elevata resistenza sia per la loro flessibilità che rende più semplice la loro messa in opera.

Nei secoli scorsi si forgiavano piatti metallici che venivano inseriti all'interno delle pareti murarie (in genere a metà dello spessore della muratura) durante la fase costruttiva. Le estremità dei piatti metallici erano ancorate ad un sistema formato da due elementi metallici appropriatamente sagomati, accostati per formare un sistema di ancoraggio cosiddetto ad Y (Figura 2.6a). La connessione tra i piatti metallici (catene) ed il sistema di ancoraggio ad Y era effettuata sagomando ad uncino l'estremità del piatto metallico la cui azione veniva resa efficace all'atto della posa inserendo un cuneo di ferro tra l'uncino ed il sistema di connessione ad Y.

Spesso l'inserimento del cuneo era preceduto da un riscaldamento del piatto metallico al fine di consentirne l'allungamento. L'inserimento del cuneo ed il naturale raffreddamento del piatto metallico determinavano la nascita di uno stato di trazione nell'elemento metallico ed un conseguente stato di compressione tra il sistema di ancoraggio ad Y e la muratura. Con l'impiego dei piatti metallici venivano superati anche lunghi tratti di muratura da proteggere attraverso un sistema di connessione tra piatti tramite forgiatura ad uncino, resa solidale con fasciatura.

In queste ultime tipologie che prevedevano l'inserimento di piatti metallici all'interno della muratura, il contatto diretto acciaio-muratura era una necessità in quanto la loro introduzione era eseguita contestualmente alle pareti murarie. Come conseguenza, tale tipologia di connessione comportava una distribuzione continua di forze tangenziali muratura-acciaio, che interessava tutto il tratto di intervento.



**Figura 2.6.** a) ancoraggio; b) prima e dopo la rivoluzione industriale; c) di recente concezione.

A seguito della rivoluzione industriale di fine Ottocento, il sistema di connessione ha cambiato tipologia, a causa della capacità di realizzare in serie tondini di acciaio con estremità filettate e dadi (Figura 2.6b). Pertanto venne meno la necessità di lavorare il ferro tramite forgiatura e risultò superata la modalità di esecuzione. Infatti, il sistema di connessione barra metallica-dado avveniva tramite filettatura e la messa in trazione della barra metallica avveniva attraverso la ammorsatura forzata del dado. Tale azione si trasferiva sull'estradosso della parete muraria tramite piastre, di geometria variabile, tutte con lo scopo di trasferire le azioni sulla muratura in maniera efficace.

In epoca più recente è stata impiegata la fune di acciaio con capotesta (cilindro) filettato (Figura 2.6c).

L'impiego delle funi o anche di barre metalliche con estremità filettate, alternative nei casi di più semplice esecuzione, intende razionalizzare le modalità di intervento sia per contrastare i Modi possibili di rottura sia per la facilità di impiego.

*Dal punto di vista tecnologico* ha dei grandi vantaggi:

- Può essere eseguito in qualsiasi momento della vita della costruzione, anche e principalmente con carattere di prevenzione;
- La presenza della guaina entro cui può scorrere la fune impedisce qualsiasi contatto con la muratura, consentendo così il trasferimento delle azioni da una parte della costruzione ad un'altra parte, quest'ultima capace di resistere meglio alle azioni sismiche in quanto tra le due estremità si frappone la parete muraria;
- La tirantatura da eseguire sulla fune tramite dinamometri può essere stabilita attraverso specifiche analisi<sup>1</sup>;
- L'intervento risulta poco invasivo e non visibile eccetto che per la presenza delle piastre.

*Dal punto di vista della sicurezza:*

- Consente un monitoraggio continuo della costruzione se soggetta a fenomeni di dissesto, in quanto la originaria tirantatura può essere controllata in qualsiasi momento, stabilendo così se vi è un fenomeno di dissesto in atto o se il sistema di connessione risulta efficace;
- Una buona scelta del posizionamento delle piastre consente di trasferire le azioni dovute al sisma nella parte di muratura che presenta una maggiore resistenza. Pertanto si consiglia la introduzione di catene solamente in corrispondenza delle pareti di rigidità elevata;
- La reversibilità dell'intervento è consentita in quanto è data la possibilità di sostituire la fune presente con altre funi di maggiore dimensione o prestazione.

Infine il costo di realizzazione dell'intervento è modestissimo: basta osservare la sequenza dei lavori necessari, che di seguito è riportata.

Fasi di intervento per la posa in opera dei cavi (funi o barre):

- 1) Individuazione delle pareti da sottoporre ad intervento e posizionamento delle quote dove inserire i cavi;
- 2) Formazione di alloggiamento nastriforme all'interno ed all'esterno della muratura;
- 3) Regolarizzazione della superficie di appoggio delle piastre;
- 4) Inserimento della guaina formata da tubo polivinilico nell'alloggiamento nastriforme;
- 5) Chiusura dell'alloggiamento con malta idraulica a base inorganica;

<sup>1</sup> F. Cucco, T. Panzeca, M. Salerno, S. Terravecchia, *Strutture in muratura – Le catene nel consolidamento*, Grafill, IV ed., Palermo, 2014.



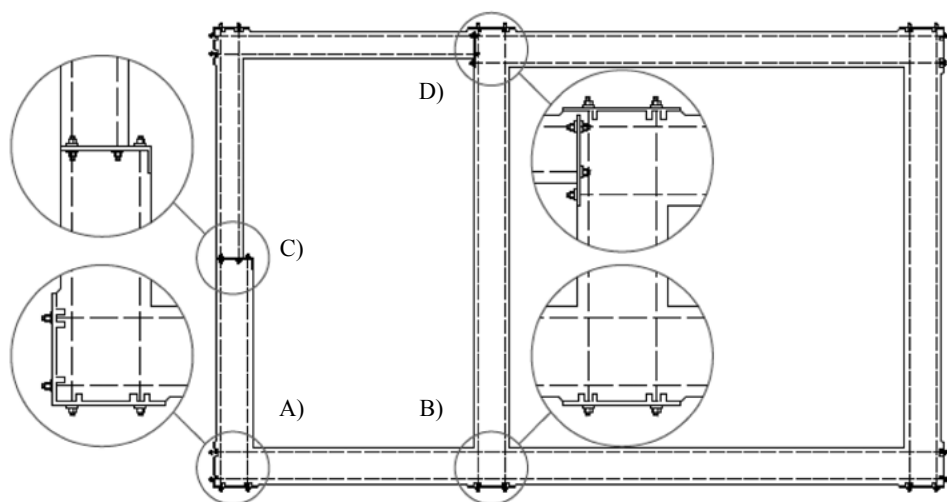
- 6) Inserimento del cavo con capotesta ed estremità filettate entro la guaina;
- 7) Preliminare serraggio dei cavi con piastra e bulloni;
- 8) Scarificazione dei giunti tra le pietre della superficie limitrofa a quella interessata dallo scasso e loro sigillatura con malta idraulica a base inorganica;
- 9) Ripristino della superficie del muro con eventuale rifacimento intonaco;
- 10) Idonea tesatura dei cavi, basata su una verifica dello stato di sforzo nell'area di intervento.

La guaina, formata di norma da tubo polivinilico possibilmente rinforzato con fili a spirale, è introdotta all'interno dell'alloggiamento nastriforme per impedire il contatto diretto tra cavo e muratura.

La presenza di cavi a coppie collocati all'esterno ed all'interno della parete ha come scopo quello di determinare nella parete muraria, a fine tesatura eguale per i due cavi, uno stato di sforzo di compressione centrato.

La tesatura dei cavi è eseguita tramite una coppia di serraggio  $M_t$  [Nm] data dalla seguente relazione:  $M_t = 0,2 H d$ , con  $d$  [mm] diametro nominale della barra,  $H$  [kN] forza di pretrazione che si vuole introdurre e 0,2 coefficiente di attrito della filettatura.

Nella Figura 2.7 è mostrata una rappresentazione schematica di alcune particolarità per il posizionamento dei cavi in funzione di esigenze tecnologiche e funzionali.

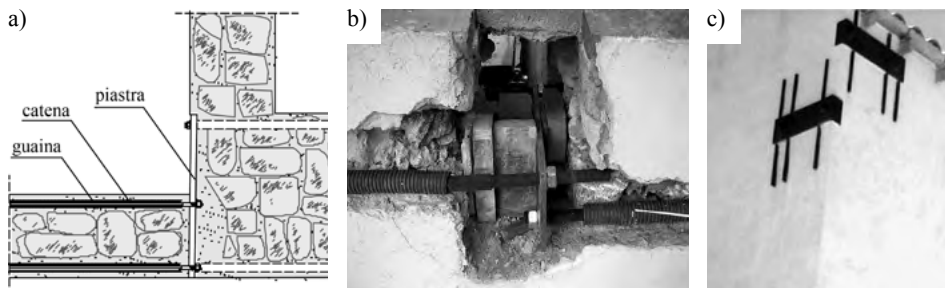


**Figura 2.7.** Posizionamento dei cavi: A) in corrispondenza del cantedale; B) all'innesto del muro di facciata con il muro trasversale; C) in presenza di discontinuità nello spessore della muratura; D) in presenza di B) + C).

Nell'impiego dei cavi (funi o barre), particolare attenzione deve essere posta:

- quando la parete dove si interviene presenta spessori differenti (Figura 2.8a,b), o quando la lunghezza della parete risulta eccessiva: in tali casi è necessario che i cavi siano interrotti da una piastra dove viene eseguita una connessione tipologicamente analoga a quella che viene utilizzata nelle parti terminali;
- nelle piastre d'angolo che devono connettere i cavi su due pareti ortogonali, in quanto gli stessi cavi devono giacere su piani sfalsati;

- nella piastra d'angolo che deve connettere i tiranti lungo una sola parete, in quanto essa deve possedere un risvolto di circa cm 10 (Figura 2.8c) per rendere più resistente lo spigolo della piastra indebolita dalla presenza del foro.



**Figura 2.8.** a,b) piastra in presenza di spessore di muratura differente; c) piastre d'angolo.

In presenza di *funi* la dimensione della guaina deve prevedere il passaggio del capotesta che caratterizza il tenditore di ammassaggio.

Al posto dei cavi può essere utile, nonché più economico, l'impiego di *barre metalliche*. La difficoltà dipende dalla necessità di esecuzione di tale intervento nelle parti più alte della costruzione. La barra deve essere inserita nella guaina e il sistema barra-guaina deve essere collocato contestualmente nell'alloggiamento nastriforme predisposto. Per lunghezze maggiori possono essere collocati più tratti di barre, inserite in guaine separate, mutuamente connesse con tenditori. Ovviamente tale scelta (funi o barre) dipende anche dai differenti valori dei carichi limite.

Una considerazione va espressa qualora si preveda l'impiego di cordoli in c.a. anziché dei cavi. Infatti, la esecuzione dei cordoli in cls armato durante la fase di demolizione della muratura risulta estremamente onerosa per la tipologia dell'intervento. Peraltro le fasi di lavorazione creano dissesti su tutta la muratura in quanto l'energia, prodotta dai martelli demolitori, determina una rottura dei legami molecolari tra il pietrame e la malta.

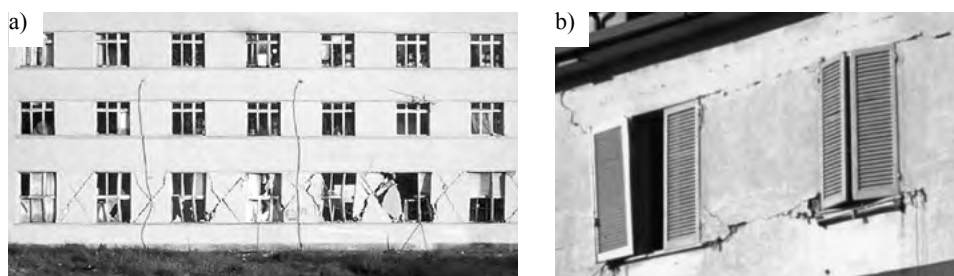
Facendo un confronto economico tra l'impiego dei cavi o delle barre e l'inserimento dei cordoli in cls armato, si può affermare che la realizzazione dei cordoli in c.a., dovendo prevedere necessariamente la sostituzione dei solai per aspetti costruttivi, risulta di gran lunga più onerosa oltre che invasiva.

### 2.3. Meccanismi di rottura in presenza di azioni agenti in piano o per cedimenti fondali

L'analisi dei pannelli soggetti ad azioni agenti nel piano è di rilevante importanza in quanto i danni prodotti da tali azioni riducono la rigidità dei pannelli danneggiati, creando quindi un sistema strutturale più vulnerabile. La modifica della rigidità del pannello danneggiato per effetto delle azioni (forze o cedimenti fondali) agenti in piano è di difficile valutazione in quanto si deve procedere con una analisi non lineare, cioè con una successione di analisi dello stato di sforzo su ciascun pannello a geometria variabile, dovuta alle discontinuità che nascono nella muratura.

### 2.3.1. Forme di danneggiamento dovute al sisma

Le forme di danneggiamento conseguenti all'azione di un sisma si manifestano tra aperture vicine e in genere nei maschi murari secondo la classica forma di Croce di Sant'Andrea (Figura 2.9a), ma anche attraverso la nascita di soluzioni di continuità (Figura 2.9b) in corrispondenza della base e della sommità delle aperture. Tale effetto è causato certamente dalla presenza di un legante tra conci di qualità scadente.



**Figura 2.9.** Forme di danneggiamento dovute a sisma:  
a) secondo Croce di Sant'Andrea; b) soluzione di continuità in piano.

### 2.3.2. Forme di danneggiamento dovute a cedimenti differenziati della fondazione o a modifiche antropiche

Le forme di danneggiamento dovute a cedimenti differenziati del sedime di fondazione o come effetti di modifiche antropiche (introduzione o soppressione parziale o totale di pannelli), effettuate nella muratura per una diversa fruizione degli spazi, si manifestano con andamento curvilineo con la concavità rivolta verso il basso o qualche volta con andamento verticale.

Le lesioni ad andamento curvilineo (Figura 2.10a) caratterizzano la nascita spontanea nella muratura di un arco o semiarco, ai lati del quale si sviluppano le linee di forza di compressione che trasferiscono le tensioni verso il basso. Quelle ad andamento verticale (Figura 2.10b) dipendono molto dall'insufficiente ammortamento dei blocchi murari che in quella zona sono collocati secondo una connessione cosiddetta 'a sorella' (cioè con blocchi di pietra gli uni sopra gli altri e non sfalsati).



**Figura 2.10.** Villa Rose – Lercara:  
lesione a) ad andamento curvilineo; b) ad andamento verticale.

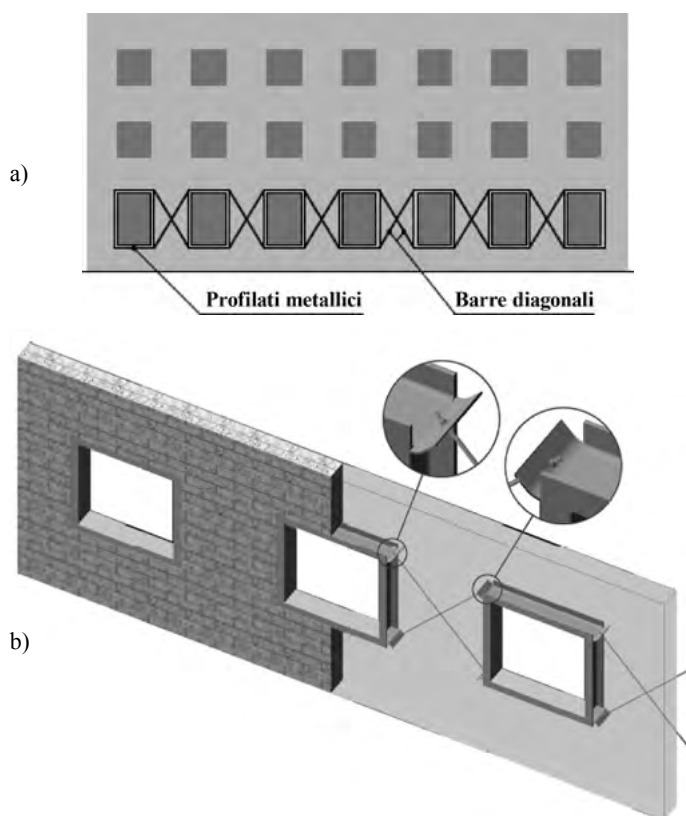
### 2.3.3. *Forme di danneggiamento in muratura diffusamente fratturata*

Spesso nelle pareti delle costruzioni murarie si è in presenza di una muratura formata da pietrame informe posto alla rinfusa e da malta invecchiata, che ha quindi perduta gran parte delle proprie caratteristiche di legante. In tal caso nel paramento murario si ha la presenza di fratture e sconnesioni diffuse che caratterizzano una condizione di forte dissesto.

Se questi pannelli sono soggetti ad azione sismica la distribuzione delle tensioni di compressione e di trazione che ne consegue è caratterizzata da punte elevate di sofferenza che, per il loro rapido alternarsi di segno, determina fratture diffuse o localizzate, causando instabilità locale che può divenire instabilità globale.

### 2.3.4. *Riconnessione di lesioni dovute al sisma*

La riconnessione della muratura fratturata secondo lesioni a forma di Croce di S. Andrea comportano un risanamento integrale con sostituzione totale del pannello, ma eseguito con gradualità. Al fine di sanare i pannelli danneggiati o di evitare il riprodersi di questo dissesto, è possibile intervenire nei maschi murari danneggiati e di quelli più soggetti a rischio, e principalmente quelli del piano terra, introducendo un sistema reticolare a croce con barre, secondo lo stesso andamento delle fratture come mostrato in Figura 2.11a.



**Figura 2.11.** a) schema di riconnessione della muratura fratturata dovuto a sisma; b) particolare della connessione tra i telai in acciaio sagomato delle finestre e le barre.

Il sistema reticolare deve essere integrato da telai in acciaio che perimetrano le aperture. Ovviamente l'ancoraggio barre-telai deve essere eseguito con perizia: una soluzione potrebbe essere quella mostrata nel particolare della Figura 2.11b.

### 2.3.5. Riconnessione di lesioni dovute a cedimenti differenziati della fondazione o a modifiche antropiche

Nel caso di muratura fratturata, ed in special modo quando la frattura interessa l'intero spessore della muratura (lesione passante), al fine di consentire la connessione tra le parti vengono suggerite tecniche di ricucitura (sarcitura) delle lesioni, alternative e migliorative del sistema tradizionale scuci e cucì. Tali sarciture consistono nell'inserimento di connettori in pietrame calcareo di opportune dimensioni, collocati a quote diverse in corrispondenza della lesione passante, lungo le due facce del muro (all'interno ed all'esterno), come nelle foto di Figura 12a,b. Questo intervento deve essere seguito da un riempimento della lesione con malta di calce (Figura 12c), previa riconnessione della lesione con mattoni di cotto e successiva sigillatura. Il riempimento avviene inserendo malta di calce a bassa pressione entro tubi in PVC di piccolo diametro, allo scopo predisposti lungo tutta la lesione.



**Figura 2.12.** a) riconnessione con connettori di pietrame nella parete esterna; b) eguale intervento nella parete interna; c) tubicini in PVC entro cui si inietta la malta di calce.

Questa tipologia di intervento è stata proposta da G. Amico<sup>2</sup> prima e successivamente da G. Valadier<sup>3</sup> per il consolidamento della cupola di S. Pietro.

Fasi di intervento:

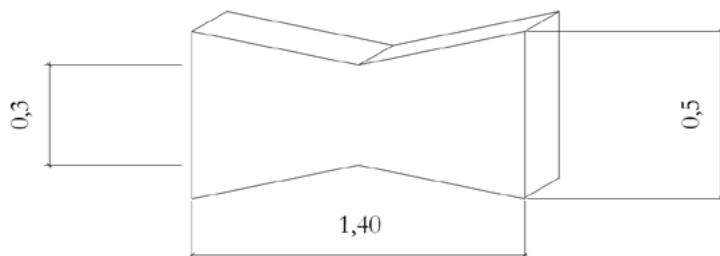
- 1) Scarnificazione della lesione per tutta la sua lunghezza e successiva pulitura con getto d'acqua;
- 2) Approntamento di blocchi lapidei (Figura 2.13) che non presentano apparenti segni di discontinuità, in numero adeguato. Dimensioni consigliate: lunghezza  $l = \text{cm } 100-140$ , altezza variabile a coda di rondine sul lato terminale  $h_1 = \text{cm } 50-60$ , al centro  $h_2 = \text{cm } 30-40$ , spessore  $s = \text{cm } 12-20$ ;
- 3) Formazione di alloggiamento avente le dimensioni del blocco lapideo da inserire, effettuato a cavallo della lesione esistente con asse del blocco ortogonale alla lesione; se ne

<sup>2</sup> G. Amico, *Sulla proposta di consolidamento della cupola di San Pietro*, Biblioteca Apostolica Vaticana, Cicognara, V, 3849, f.6r., 1743, citazione su indicazione del Prof. Marco Nobile.

<sup>3</sup> G. Valadier, *L'Architettura pratica*, tomo IV, sez. XX, articolo LXVIII, p. 72, Roma 1831, citazione su tesi di laurea sul San Giovanni dei Lebbrosi degli all. arch. Gruppuso Enrico e Di Vita Laura, rel. Prof.ssa Renata Prescia.

prevedono per ogni piano due o tre disposti sfalsati alternativamente all'interno ed all'esterno del pannello murario;

- 4) Inserimento di malta di calce lungo la parete frontale ed ai lati dove deve essere collocato il blocco lapideo;
- 5) Inserimento del blocco lapideo;
- 6) Collocazione di scaglie di pietra cuneiforme o cunei di legno duro e riempimento dei vuoti con malta di calce a base inorganica.



**Figura 2.13.** Dimensione tipo di blocco lapideo a doppia coda di rondine.

Ripetizione dei punti 3-6 per collocazione di altri blocchi.

I vuoti che caratterizzano la lesione passante, sia sul lato esterno che interno, devono essere riempiti con boiaccia di calce, secondo la seguente sequenza:

- 1) Sigillatura completa della lesione con malta di calce con l'inserimento di mattoni pressati nelle parti maggiormente fratturate;
- 2) Contestuale inserimento di tubicini di plastica lungo la lesione ad intervalli di circa cm 40-60;
- 3) Inserimento di malta di calce (Figura 2.12c) tramite tubi di piccolo diametro a partire dal basso e procedendo via via con quelli posti più in alto, al fine di conferire continuità anche all'interno della parete muraria.

Con questa strategia il riempimento dei vuoti lasciati dalla lesione si manifesta attraverso la fuoruscita della malta nel tubicino più basso.

La tecnica appena illustrata risulta più vantaggiosa rispetto alla tecnica di ripristino a scuci e cucì, con l'uso dei mattoni pressati, tradizionalmente impiegata, poiché quest'ultima presenta due inconvenienti:

- 1) Durante la fase di intervento, nel caso in cui è interessato l'intero spessore del muro, le linee di forza di compressione, che originariamente corrono pressoché parallelamente alla lesione (Figura 2.14a), seguono percorsi diversi allontanandosi dalla originaria lesione al crescere dell'apertura della breccia (Figura 2.14b).

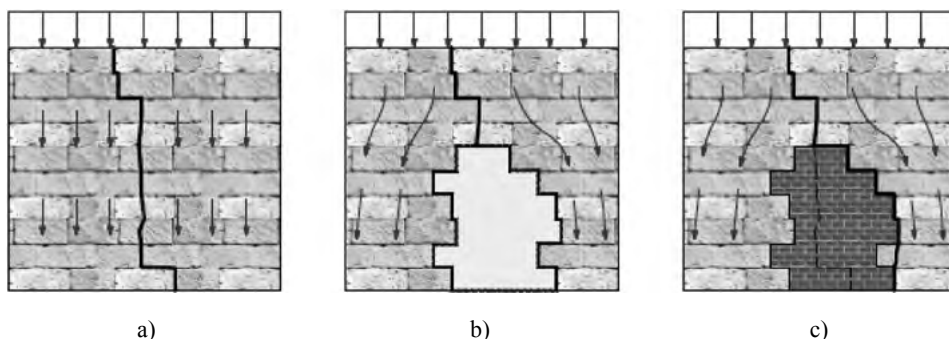
Come conseguenza, immediatamente dopo l'intervento, i mattoni posti nella zona ricostruita (Figura 2.14c) non risultano soggetti ad alcuna tensione, tranne a quella dovuta al peso proprio, mentre lo stato di sforzo che si è allontanato dalla originaria lesione permane nella stessa zona.

L'eventuale trasferimento delle azioni interne, dalla muratura originaria non interessata dall'intervento di scuci e cucì alla breccia dove sono stati inseriti i mattoni, dipende dal



cambio di configurazione della muratura o anche dalla modifica delle proprie caratteristiche fisico-geometriche: questo è un fenomeno reologico che si verifica lentamente nel tempo;

- 2) Se la causa che aveva provocato la lesione risulta ancora attiva, di norma la lesione si riproduce in corrispondenza dell'attacco tra il vecchio muro e la parte di muro ricostruito con mattoni, come mostrato in Figura 2.14c.



**Figura 2.14.** a) frattura con linee di forza parallele alla lesione; b) spostamento delle linee di forza ai lati della breccia; c) riempimento con mattoni con possibilità del formarsi della lesione tra vecchia e nuova muratura.

### 2.3.6. Consolidamento di muratura diffusamente fratturata

Ai fini del miglioramento delle pareti diffusamente fratturate l'intervento più idoneo è rappresentato dall'inserimento di travi di legno di essenza dura, a coppie, disposte sulle due facce in posizione orizzontale, incassate nelle pareti e realizzate secondo le seguenti fasi di intervento:

- 1) Puntellamento dei solai appoggiati sul muro interessato dall'intervento;
- 2) Formazione di alloggiamento nastriforme su un lato della parete muraria;
- 3) Preparazione dell'alloggiamento per l'appoggio della trave;
- 4) Posizionamento della trave di legno;
- 5) Introduzione di cunei di legno duro o scaglie di pietra cuneiforme per garantire una immediata continuità strutturale e chiusura completa dell'alloggiamento con malta di calce;
- 6) Ripristino della superficie del muro ed eventuale rifacimento di intonaco;
- 7) Ripetere l'intervento da 2 a 6 sull'altra faccia della parete muraria;
- 8) Laddove si ritiene necessario – presenza di muratura a sacco o materiale fortemente disgregato – il posizionamento delle travi può essere effettuato alla stessa quota, al fine di collegare le travi con tondini filettati e bulloni.

L'inserimento delle travi di legno ha parecchi vantaggi, tra cui si segnala la creazione della continuità fisica tra le varie zone difformi della parete muraria e la capacità di ottenere sul piano di appoggio una distribuzione di tensioni variabili con continuità, limitando così la concentrazione delle tensioni. Tale intervento evoca la stessa tecnica che molto spesso veniva impiegata durante la fase costruttiva.

Non si consiglia l'impiego dei profilati di acciaio in alternativa, in quanto la ossidazione causerebbe condizioni di rigetto.

#### **2.4. Interventi dettati in normativa, ma sconsigliati**

Una delle possibilità dettate dalla Normativa, per migliorare le capacità di resistenza dei pannelli murari, è “l’intonaco armato” suggerito nella n. 617 – Cap. C8A.2. L’intervento è invasivo in quanto l’intonaco esistente è sostituito da un intonaco cementizio con armatura metallica lungo le due facce della parete, collegate da barre trasversali uncinatate. Tale tipologia di intervento dà luogo ad alcuni inconvenienti, quali la ossidazione delle armature metalliche con fenomeni di rigetto e la riduzione della traspirazione della muratura. Peraltro non è possibile creare una continuità di intervento nella stessa parete tra i piani per la presenza dei solai.

Altra soluzione proposta nella Circolare n. 617 – Cap. C8A.5.1, è data dalle perforazioni armate da eseguire nella muratura ed agli incroci tra pareti murarie per migliorarne la connessione. Questo intervento crea un sistema strutturale non facilmente descrivibile, riduce o addirittura elimina la coesione tra conci per la distruzione dei legami molecolari malta-conci durante la fase di perforazione e, come per l’intonaco armato, è sottoposta a rigetto.

In ambedue i casi possono essere impiegate barre zincate (ma la zincatura ha un effetto limitato nel tempo) ovvero barre in acciaio inox estremamente costose, ma in ogni caso non si elimina il danno prodotto dalla perforazione.

Peraltro queste tecniche di intervento impiegano materiali e tecniche costruttive non compatibili con i materiali esistenti.

Al fine di migliorare la consistenza delle pareti murarie si suggerisce di intervenire con una tecnica che prevede la scarificazione dei giunti e la introduzione di malta di calce, ricostruendo così la continuità della superficie tra il pietrame e la malta introdotta. Tale soluzione, se effettuata sulle due facce di ciascuna parete determina un miglioramento strutturale consistente, in quanto la bonifica della cortecchia determina sulla parete una capacità di resistenza migliorata rispetto allo condizione prima dell’intervento.