



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

***RACCOMANDAZIONI PER L'ANALISI,
CONSERVAZIONE E RESTAURO STRUTTURALE DEI
BENI ARCHITETTONICI****

DOCUMENTO APPROVATO DAL COMITATO
IL 15 GIUGNO 2005 A BARCELONA

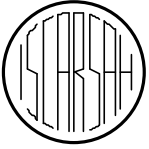
* versione italiana delle *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage* redatte in lingua inglese dall'*International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage*.



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

<i>Presidente</i>	CROCI Giorgio	(ITALIA)
<i>Segretario</i>	YEOMANS David Koenraad	(G.B.)
<i>Tesoriere</i>	SCHMUCKLE-MOLLARD Christiane	(FRANCIA)
<i>Direttivo</i>	HIDAKA Kenichiro	(GIAPPONE)
	KELLEY Stephen	(USA)
	ARUN Gorun	(TURCHIA)
	SCHAFFER Yacoov	(ISRAELE)
	SCHMIDT Wolf	(GERMANIA)
	WIJERATNE Pali	(SRI LANKA)
	MILTADOU Androniki	(GRECIA)
<i>Membri votanti</i>	BALDERSTONE Susan	(AUSTRALIA)
	BJØRBERG Svein	(NORVEGIA)
	ELIZBARASHVILI Irine	(GEORGIA)
	EMMET Patricia	(SUD AFRICA)
	GAVRILOVIC Predrag	(MACEDONIA)
	FONTAINE Lyne	(CANADA)
	HAUSER	(AUSTRIA)
	HERUC Svebor	(OLANDA)
	KANTOVA Olga	(REP. CECA)
	LOURENCO Paulo	(PORTOGALLO)
	MACCHI Giorgio	(ITALIA)
	PENTINMIKKO Juhani	(FINLANDIA)
	ROCA Pete	(SPAGNA)
	SALMOND Jeremy	(NUOVA-ZELANDA)
	SCHROETER Heinrich	(GERMANIA)
	SEGARRA-LAGUNES Maria Margarita	(MESSICO)
	SOFRONIE Ramiro	(ROMANIA)
	SINDING-LARSEN Amund	(NORVEGIA)
	VAN BALEN Koen	(BELGIO)
	WIRTZ Patrick	(LUSSEMBURGO)
<i>Membri associati</i>	BINDA Luigia	(ITALIA)
	CHARKIOLAKIS Nikos	(GRECIA)
	DRDACKY Miols	(REP. CECA)
	FERWERDA Wilfred	(CANADA)
	GREEN Melvyn	(USA)
	HALLEUX Pierre	(BELGIO)
	KNOLL Eduard	(GERMANIA)
	JOKINEN Eric	(CANADA)
	LOOK David	(USA)
	MANIERI ELIA Giovanni	(ITALIA)
	MODENA Claudio	(ITALIA)
	MORTON Brian	(UK)
	TAMPONE Gennaro	(ITALIA)
	YUZUGULLU Ozal	(TURCHIA)
<i>Membri onorari</i>	SILVA Roland	(SRI LANKA)

Curatore della versione italiana delle Raccomandazioni: Giovanni MANIERI ELIA



RACCOMANDAZIONI PER L'ANALISI, CONSERVAZIONE E RESTAURO
STRUTTURALE DEI BENI ARCHITETTONICI

Indice

SCOPO DEL DOCUMENTO

Parte I – PRINCIPI

- 1 Aspetti generali*
- 2 Indagini e diagnostica*
- 3 Interventi e controlli*

Parte II – LINEE GUIDA

- 1 Criteri generali***
- 2 L'acquisizione dei dati e le indagini*
 - 2.1 Generalità*
 - 2.2 Ricerca storica*
 - 2.3 Rilievo-analisi della struttura*
 - 2.4 Ricerche sul campo e prove di laboratorio*
 - 2.5 Monitoraggio delle strutture*
- 3 Il comportamento strutturale*
 - 3.1 Aspetti generali*
 - 3.2 Forma, schema strutturale e dissesti*
 - 3.3 Caratteristiche dei materiali e processi di degrado*
 - 3.4 Azioni agenti sulla struttura e sui materiali*
- 4 Diagnosi e valutazione della sicurezza*
 - 4.1 Aspetti generali*
 - 4.2 Identificazione delle cause (Diagnosi)*



4.3 *Valutazione della sicurezza*

4.3.1 *Il problema della valutazione della sicurezza*

4.3.2 *L'approccio storico*

4.3.3 *L'approccio qualitativo*

4.3.4 *L'approccio analitico*

4.3.5 *L'approccio sperimentale*

4.4 *Il giudizio – valutazioni sulla sicurezza*

5 *Scelta degli interventi – Il Rapporto esplicativo*

ALLEGATO

Dissesti strutturali, degrado dei materiali e criteri d'intervento

1 *Introduzione*

1.1 *Aspetti generali*

1.2 *Assestamenti di suolo*

2 *Costruzioni in muratura*

3 *Strutture in legno*

4 *Strutture in ferro e acciaio*

5 *Strutture in cemento armato*



SCOPO DEL DOCUMENTO

Spesso i codici moderni e le normative sulle costruzioni attuali sono tali da non essere applicabili al patrimonio architettonico esistente il quale, per la sua natura e per la sua storia, risulta essere più complesso e ricco di implicazioni di cui non si può non tenere conto.

Raccomandazioni specifiche, dunque, non solo sono auspicabili, ma si rendono necessarie per stabilire i procedimenti secondo cui condurre le analisi, prendere le decisioni ed effettuare le scelte in un quadro di coerenza scientifica e culturale; esse si propongono di rappresentare una guida utile per chiunque si occupi dei problemi della conservazione e del restauro, ma è evidente come esse non possano sostituire la conoscenza acquisibile da testi storici, scientifici e tecnici.

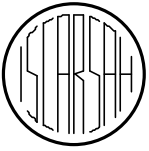
Le Raccomandazioni presentate in questo documento sono suddivise in due parti: i *Principi*, ove vengono presentati i concetti base della conservazione e del restauro e le *Linee guida*, ove vengono esposte le procedure e le metodologie da seguire negli studi preliminari e nella progettazione.

Parte I

PRINCIPI

1 ASPETTI GENERALI

- 1.1 La conservazione ed il restauro del Patrimonio Architettonico richiedono un approccio multidisciplinare
- 1.2 Il valore e l'autenticità del Patrimonio architettonico non possono valutarsi in base a criteri universali, perché il rispetto delle diverse culture richiede che il Patrimonio appartenente a ciascuna di esse sia considerato nel proprio contesto culturale
- 1.3 Il valore di ogni costruzione storica risiede non solo nella sua apparenza, ma anche nell'insieme di tutte le sue componenti, come prodotto unitario della cultura tecnologica specifica di ogni luogo ed epoca di costruzione. In particolare la rimozione o lo stravolgimento delle strutture interne con la conservazione delle sole facciate non rispetta i principi generali della cultura del restauro.
- 1.4 Eventuali cambiamenti di destinazione d'uso devono confrontarsi con le istanze della conservazione e della sicurezza.
- 1.5 Gli interventi sulle strutture del Patrimonio Architettonico devono sempre valutarsi nel quadro generale della conservazione e restauro della costruzione nell'insieme di tutti i suoi valori.
- 1.6 La peculiarità delle strutture del Patrimonio Architettonico, con la loro complessa storia, richiede l'organizzazione di studi ed analisi secondo tappe precise che sono analoghe a quelle seguite in medicina: *anamnesi*, *diagnosi*, *terapia* e *controlli* corrispondono infatti rispettivamente, alla ricerca dei dati e delle informazioni, all'individuazione delle cause del dissesto e del degrado, alla



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

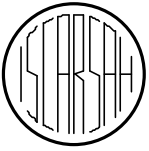
sceita degli interventi ed infine al controllo, anche protratto nel tempo, dell'efficacia dei risultati. Nell'intento di incrementarne l'efficienza e l'efficacia può essere opportuno che la successione delle fasi segua un processo iterativo.

- 1.7 Nessun intervento deve essere intrapreso senza aver preventivamente accertato i benefici che possono con esso conseguirsi, il suo impatto sulla costruzione storica e gli eventuali effetti collaterali, anche a lungo termine.

In situazioni di emergenza si può derogare da queste condizioni, scegliendo comunque soluzioni che producano minime alterazioni permanenti.

2 INDAGINI E DIAGNOSTICA

- 2.1 È opportuno che l'impostazione di un progetto, fin dalle prime, (come la visita del sito e la preparazione del programma di indagini), sia effettuata da un gruppo multidisciplinare, scelto in relazione al tipo ed alla complessità dei problemi.
- 2.2 In genere, occorre in primo luogo analizzare i dati e le informazioni facilmente disponibili e, solo in un tempo successivo, preparare un più completo piano di indagini, quando si siano meglio compresi gli effettivi problemi della struttura.
- 2.3 Una completa comprensione dei comportamenti strutturali e delle caratteristiche dei materiali è essenziale per ogni progetto di conservazione e di restauro. Questa conoscenza deve riferirsi alla struttura nelle sue condizioni originarie, alle tecniche costruttive dell'epoca, alle alterazioni subite, ai fenomeni che si sono di volta in volta susseguiti ed, infine, all'opera nello stato attuale.
- 2.4 Problemi particolari possono porsi durante gli scavi archeologici quando le strutture emergenti devono essere via via stabilizzate senza averne ancora una conoscenza sufficiente. I problemi di conservazione di una costruzione emergente da uno scavo possono essere assai diversi da quelli di una struttura che è stata sempre esposta all'atmosfera. Gli eventuali interventi urgenti durante gli scavi devono comunque rispettare e la concezione tecnologica e strutturale originaria.
- 2.5 La diagnostica è basata su approcci di carattere storico, qualitativo e quantitativo: gli aspetti qualitativi sono basati essenzialmente sulla osservazione diretta dei dissesti strutturali e del degrado dei materiali nonché sulle ricerche storiche ed archeologiche; mentre gli aspetti quantitativi sono basati essenzialmente sulle misure dirette, sulle indagini sui materiali e le strutture, sul monitoraggio nonché sulle analisi strutturali esperite mediante procedimenti più o meno sofisticati di calcolo.
- 2.6 Prima di prendere decisioni sugli interventi di carattere strutturale è indispensabile determinare con esattezza le cause dei dissesti e del degrado e quindi valutare i livelli di sicurezza attuali.
- 2.7 La valutazione della sicurezza, che segue la fase della diagnostica, è il momento in cui si prendono le decisioni sugli eventuali interventi ed è basata su analisi quantitative e qualitative: l'osservazione dell'opera, la ricerca storica, l'analisi strutturale e, quando necessario, prove ed indagini.

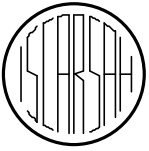


ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

- 2.8 L'applicazione degli stessi criteri di sicurezza richiesti per le costruzioni nuove può spesso portare ad interventi eccessivi, se non sulle costruzioni storiche. In questi casi, analisi specifiche e valutazioni appropriate possono giustificare approcci diversi nel valutare la sicurezza. In particolare, sulla base di valutazioni quantitative e qualitative, si può accettare di incrementare il livello di sicurezza secondo il principio del *miglioramento*, senza dover rispettare in tutto le verifiche analitiche previste per le nuove costruzioni.
- 2.9 Tutti gli aspetti connessi all'acquisizione dei dati, alla diagnostica, alla valutazione della sicurezza ed ai motivi per cui si è deciso di intervenire e con quali modalità devono essere riportati in un *Rapporto Esplicativo*.

3 INTERVENTI E CONTROLLI

- 3.1 Gli interventi devono agire sulle cause piuttosto che sugli effetti.
- 3.2 La manutenzione può spesso evitare l'insorgere dei dissesti e dei fenomeni di degrado minimizzando, e differendo nel tempo, gli interventi più pesanti.
- 3.3 La valutazione della sicurezza e una chiara comprensione storico-culturale della struttura devono essere alla base delle scelte .
- 3.4 Nessun intervento deve essere effettuato senza aver dimostrato la sua indispensabilità.
- 3.5 Ciascun intervento deve essere calibrato sugli obiettivi di sicurezza, contenendo quindi gli interventi al minimo necessario per assicurare sicurezza e durabilità con il minimo impatto sul valore storico del bene.
- 3.6 Il progetto degli interventi deve essere basato su una chiara comprensione del tipo di azioni (forze, deformazioni, accelerazioni, ecc.) che hanno agito nel passato causando degrado e dissesti nonché su ragionevoli previsioni di quelle che potranno verificarsi in futuro.
- 3.7 La scelta tra tecniche d'intervento "tradizionali" e "innovative" deve essere valutata caso per caso, dando la preferenza a quelle meno invasive, più reversibili e maggiormente compatibili con i valori storici, tenendo conto dei requisiti di sicurezza, durabilità accertata, compatibilità fisica e chimica, manutenibilità. Spesso sono proprio le tecnologie tradizionali quelle che meglio rispondono ai requisiti indicati.
- 3.8 Le difficoltà nel valutare gli effettivi livelli di sicurezza ed i possibili benefici degli interventi suggeriscono, talvolta, di procedere mediante un processo progettuale che perduri nella fase di esecuzione dei lavori adottando il "criterio della valutazione progressiva dei benefici" cominciando, cioè, con un intervento minimo iniziale e lasciando la possibilità di adottare successivamente, in una o più fasi, soluzioni integrative o correttive.
- 3.9 Quando possibile, gli interventi devono essere "reversibili" tali, cioè, che possano, eventualmente, essere rimossi e sostituiti senza lasciare tracce, con misure alternative ritenute in futuro più



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

opportune alla luce di nuove conoscenze e quando lo sviluppo della conoscenza e delle tecnologie lo consentirà. Quando non è possibile effettuare interventi completamente reversibili, essi devono lasciare la possibilità di essere "ritrattati" consentendo rinnovamenti e integrazioni.

- 3.10 Le caratteristiche dei materiali utilizzati nel restauro (ed in particolare i nuovi materiali), nonché la compatibilità con i materiali già in opera, devono essere attentamente valutate anche in relazione ai comportamenti nel tempo (per prevenire, ad esempio, il rischio di reazioni chimiche con effetti negativi). La *compatibilità* è una condizione necessaria ma non sufficiente per accettare una soluzione, in quanto i relativi benefici devono essere preventivamente dimostrati. Il controllo deve includere anche le eventuali conseguenze a lungo termine così che possibili effetti collaterali indesiderati possano essere evitati.
- 3.11 Anche le differenziazioni delle varie parti della struttura, da quelle originali a quelle significative avvenute nel tempo sono da conservare.
- 3.12 Gli interventi devono, per quanto possibile, rispettare la concezione e le tecniche originarie della struttura, nonché le tracce di situazioni significative stratificatesi nel corso della storia, lasciando comunque evidenza di tali situazioni pregresse in modo che esse possano essere riconosciute nel futuro.
- 3.13 Gli interventi devono essere il risultato di un progetto generale ed integrato, che dia il giusto peso ai diversi aspetti: architettonici, strutturali, tecnologico-costruttivi, impiantistici, funzionali, ma anche agli aspetti storico-documentali e simbolici.
- 3.14 La rimozione o l'alterazione dei materiali storici, o di elementi caratterizzanti l'architettura, possono essere consentiti solo quando motivazioni importanti possono giustificarla (come ad esempio l'impossibilità di limitare altrimenti rischi gravi).
- 3.15 Gli elementi strutturali danneggiati, quando possibile, devono essere riparati piuttosto che sostituiti.
- 3.16 Le imperfezioni e le alterazioni, quando sono divenute parte della storia, dovrebbero essere conservate, a meno che non compromettano i requisiti di sicurezza.
- 3.17 Lo smontaggio e riassetto di una parte di una costruzione può essere considerata una soluzione possibile solo quando il tipo di materiale e di struttura consentano tali operazioni e quando la conservazione, attuata secondo altri criteri, produca più pesanti alterazioni.
- 3.18 Non si devono consentire interventi i cui effetti non si possano controllare. Ogni proposta di intervento deve essere accompagnata da un programma di controllo e monitoraggio da attuare, per quanto possibile, durante lo svolgimento dei lavori ma anche successivamente, per verificarne l'efficacia.
- 3.19 Tutte le attività di controllo e monitoraggio devono essere documentate e conservate come parte della storia della costruzione.



Parte II
LINEE GUIDA

1 CRITERI GENERALI

La conoscenza scientifica e la cultura umanistica unitamente all'esperienza sono elementi essenziali per l'analisi, la conservazione ed il restauro del patrimonio architettonico.

Solo in tale contesto, queste Raccomandazioni possono rappresentare un utile strumento ed una guida, per salvaguardare il valore culturale e storico del Bene Architettonico nella sua interezza; l'ingegneria strutturale rappresenta uno dei supporti scientifici indispensabili per ottenere questo risultato.

Queste Raccomandazioni intendono fornire un chiaro riferimento metodologico e facilitare la collaborazione tra gli esperti coinvolti.

La complessità degli studi e dei progetti riguardanti il Patrimonio Architettonico Storico rende difficile stabilire regole precise e codici di tipo tradizionale. Ciò nonostante la mancanza di chiare raccomandazioni può portare facilmente a soluzioni dubbie o arbitrarie, né l'applicazione di codici formulati per le strutture nuove può contribuire ad eliminare interpretazioni errate ed incertezze; sono un esempio di ciò le norme sismiche e quelle geotecniche le cui prescrizioni possono risultare inadeguate od anche condurre a misure eccessive, e spesso non necessarie, per una imperfetta comprensione del reale comportamento strutturale.

Pertanto, poiché gli aspetti soggettivi coinvolti nello studio e nella valutazione della sicurezza di un Bene Architettonico nonché le incertezze sui dati e sulla valutazione dei fenomeni possono condurre a conclusioni arbitrarie, si rende necessario, come già accennato, esplicitare nel *Rapporto Esplicativo* tutte le incertezze nonché l'affidabilità e le motivazioni dettagliate riguardo alle soluzioni adottate.

Questo Rapporto obbligherà ad effettuare un'analisi critica e attenta volta a giustificare accuratamente tutte le scelte di progetto comprese quelle relative al giudizio sulla sicurezza della struttura e, quindi, le decisioni ed i provvedimenti da prendere.

La valutazione di una costruzione storica non può prescindere da una olistica visione d'insieme, piuttosto che da una esclusiva visione specialistica di ogni suo aspetto.

2 L'ACQUISIZIONE DI DATI E LE INDAGINI

2.1 Generalità

La definizione di un programma di indagini richiede, spesso, un approccio interdisciplinare, che va ben al di là dei semplici aspetti tecnici; la ricerca storica può essere indirizzata a scoprire fenomeni che hanno coinvolto il comportamento strutturale e, viceversa, l'analisi del comportamento strutturale può fornire elementi che aiutino lo storico a trovare risposte alle sue ipotesi.



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

Le informazioni, in genere, riguardano la concezione strutturale, le tecniche usate nella costruzione, i processi ed i fenomeni accaduti nel passato ed, infine, le condizioni nello stato presente. Queste informazioni possono essere acquisite mediante i seguenti adempimenti:

- comprensione della geometria e delle tecnologie costruttive della struttura,
- definizione, descrizione e comprensione del significato storico e culturale dell'opera ;
- ricerca storica riguardante l'intera vita della struttura, compresi gli interventi effettuati nel passato;
- descrizione dei materiali, delle tecniche e del comportamento statico originali;
- descrizione della struttura nel suo stato attuale, inclusa l'identificazione dei dissesti, del degrado e dei possibili fenomeni in evoluzione, usando appropriati tipi di indagini;
- identificazione delle azioni agenti, del comportamento strutturale e dei tipi di materiali nel loro stato attuale;
- rilievo del sito, delle condizioni del suolo e delle condizioni ambientali

Una ispezione preliminare del sito e della costruzione deve orientare l'impostazione del piano delle indagini in quanto queste possono essere eseguite a diversi livelli di estensione e di approfondimento, con conseguenti diversi impegni economici e di tempo.

Il piano di indagini deve, pertanto, essere proporzionato alla complessità, al valore architettonico della costruzione, ai problemi strutturali da risolvere ed alla possibilità di avere effettivi benefici dal relativo approfondimento della conoscenza.

Risulta talvolta conveniente iniziare con un piano minimo di indagini e poi, quando e dove necessario, approfondirlo in fasi successive.

2.2 Ricerca storica

Lo scopo della ricerca storica è quello di comprendere la concezione ed il significato dell'edificio, le tecniche e le tecnologie usate nella sua costruzione, le modifiche alla struttura ed all'ambiente, che si sono succedute nel tempo, con particolare riguardo agli eventi che possono aver causato degrado e dissesto.

Particolare attenzione deve essere data ai metodi di catalogazione dei documenti raccolti: una meticolosa convalida ed interpretazione sono essenziali affinché i dati acquisiti producano informazioni attendibili; occorre indicare l'affidabilità delle fonti e dichiarare chiaramente le ipotesi assunte nell'interpretazione del materiale storico. La ricerca deve anche evidenziare se è stato possibile o meno individuare la storia dei dissesti, dei cedimenti, delle ricostruzioni, delle aggiunte, delle modifiche, dei lavori di restauro e di ogni cambio d'uso che ha portato la struttura alla condizione attuale.

Si deve comunque tener presente che i documenti storici sono stati generalmente preparati per scopi diversi da quelli dell'ingegneria strutturale e possono perciò, sotto questo aspetto, contenere



informazioni tecniche non corrette, omettere questioni significative oppure travisare fatti essenziali ed eventi importanti.

2.3 Rilievo – Analisi della struttura

L'osservazione diretta della struttura è la prima ed essenziale fase dello studio; di norma questa osservazione preliminare deve essere condotta da una squadra ove siano presenti le competenze necessarie in relazione ai problemi del caso per fornire un'iniziale comprensione della struttura e dare una impostazione appropriata alle indagini.

Gli obiettivi principali sono quindi:

- I) Conoscere la conformazione della struttura in tutte le sue parti, aiutandosi con elaborati grafici eventualmente esistenti,
- II) identificare il degrado dei materiali e il dissesto della struttura,
- III) determinare se i fenomeni sono stabilizzati o meno,
- VI) valutare se vi siano rischi immediati e se occorra intraprendere misure urgenti,
- V) analizzare l'influenza dell'ambiente sulla costruzione.

L'analisi dei dissesti strutturali comincia dalla mappatura dei fenomeni visibili. Durante questa attività l'esperto dovrebbe già avere un'idea del comportamento strutturale così che gli aspetti salienti possano essere esaminati con occhio critico.

Il rilievo geometrico - strutturale deve indicare i diversi tipi di materiale, il tipo di degrado, le irregolarità strutturali, il quadro fessurativo, i segni di schiacciamento, i fuori piombo, ecc.

Le irregolarità geometriche possono essere il risultato di imperfezioni originarie, di deformazioni sopravvenute o di giunzioni corrispondenti a differenti fasi costruttive nonché di modifiche successive. È importante evidenziare come l'ambiente possa influire negativamente sulla costruzione e come questa influenza negativa possa essere accentuata da un progetto originariamente carente, dall'uso di materiali non adeguati e da mancanza di manutenzione.

L'osservazione delle zone dove sono concentrati i dissesti, ed in particolare quelle di schiacciamento (elevate compressioni) e quelle di fessurazione o distacco (elevate trazioni), il rilievo delle conformazioni e direzioni delle lesioni, nonché l'indagine sulle caratteristiche del suolo, possono fornire elementi utili per individuare le cause del dissesto stesso. Questo studio può e spesso necessita di essere integrato da informazioni acquisibili con indagini specifiche.

2.4 Ricerche sul campo e prove di laboratorio

Il piano delle indagini deve essere basato su un'interpretazione preliminare, seppur approssimata, dei fenomeni in gioco in modo da poter essere indirizzato là dove i dati da acquisire possano dare un contributo significativo alla conoscenza. Le indagini di solito hanno lo scopo di identificare le caratteristiche meccaniche (resistenza, deformabilità, ecc.), fisiche (porosità, ecc.) e chimiche



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

(composizione, ecc.) dei materiali, nonché le deformazioni della struttura, la presenza di discontinuità e lesioni, ecc.

Le prove *non-distruttive* devono essere preferite rispetto a quelle che producono alterazioni nella struttura; queste ultime possono essere accettate solo in seguito ad un'analisi *costi-benefici*, valutando come *costo* la perdita culturale che può aversi e come *beneficio* il miglioramento della conoscenza e quindi la possibilità di *minimizzazione* degli interventi. Le indagini devono essere eseguite da persone specializzate, in grado assicurare l'affidabilità dei dati e l'interpretazione corretta ai fini del progetto. È consigliabile, quando possibile, seguire diversi metodi di indagine in modo da migliorare l'affidabilità dei risultati con un loro confronto incrociato. Le indagini *in situ* sono in genere completate da prove di laboratorio su campioni presi dalla struttura.

2.5 Monitoraggio delle strutture

L'osservazione della struttura, protratto nel tempo, può essere necessaria non solo per acquisire informazioni utili quando si sospettano fenomeni evolutivi o ciclici, ma anche per accertare i risultati ottenuti. Quando gli interventi sono programmati in fasi successive, il monitoraggio del comportamento strutturale può fornire indicazioni utili per l'affinamento degli interventi stessi nelle fasi non ancora eseguite.

Un sistema di monitoraggio può misurare i cambiamenti nel tempo di spostamenti, inclinazioni, deformazioni, aperture di giunti e lesioni, nonché fornire i dati ambientali (temperatura, ecc) ed alcuni parametri significativi del suolo. Il monitoraggio di tipo dinamico registra le accelerazioni, le frequenze di vibrazione, ecc. prodotte dal traffico veicolare, dal vento e soprattutto dai terremoti. Un apposito monitoraggio può anche essere utilizzato come campanello d'allarme quando alcuni parametri raggiungono la soglia di rischio.

Un metodo assai semplice per valutare i movimenti delle lesioni è quello di porre biffe in vetro su di esse. In alcuni casi può essere conveniente ricorrere a sistemi informatizzati collegando diversi strumenti ad un computer il quale registra a precisi intervalli di tempo i vari dati.

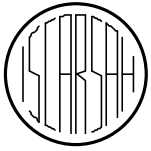
Un sistema di monitoraggio deve essere calibrato in base al carattere evolutivo dei fenomeni, valutando i vantaggi che l'acquisizione dei dati può dare ai fini della conoscenza, dell'efficacia degli interventi e della sicurezza.

3 IL COMPORTAMENTO STRUTTURALE

3.1 Aspetti generali

Il comportamento di ogni struttura è influenzato da tre fattori principali:

a) la costruzione nella sua forma, comprendendo in essa non solo la geometria, ma anche l'efficacia dei collegamenti tra i vari elementi strutturali.



- b) i materiali da costruzione utilizzati
 - c) le azioni agenti (forze, accelerazioni e deformazioni) e le azioni fisico-chimico-biologiche.
- Questi fattori sono qui analizzati in dettaglio.

3.2 Forma, schema strutturale e dissesti

Il comportamento strutturale dipende dalle caratteristiche dei materiali, dalle dimensioni della struttura, dalle connessioni tra i diversi elementi, dalle condizioni del suolo, ecc.

Il comportamento effettivo di una costruzione è spesso assai complesso così che occorre ricondursi a schemi strutturali semplificati, cioè a *modelli* in grado di mostrare più o meno rigorosamente il modo in cui la struttura resiste alle varie azioni. Lo schema strutturale mostra, in definitiva, il modo in cui le azioni sono trasformate in tensioni e sollecitazioni e come la struttura è in grado di assicurare la stabilità.

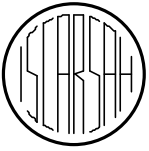
Una costruzione può essere rappresentata da diversi schemi di diversa complessità e livelli diversi di approssimazione. Lo schema originale di comportamento della struttura può cambiare a causa dei dissesti, rinforzi, od altre modifiche dell'edificio.

Lo schema utilizzato nell'analisi strutturale è in genere un compromesso tra schemi vicini alla realtà, ma troppo complessi, e schemi di facile calcolo, ma troppo lontani dalla situazione reale. Lo schema deve tenere conto delle modifiche ed indebolimenti, quali fessure, sconnessioni, schiacciamenti, fuori piombo, ecc., in quanto questi effetti sono significativi ai fini del comportamento strutturale. Modifiche possono essere prodotte sia da fenomeni naturali sia da interventi umani. Queste spesso comprendono la creazione di aperture, nicchie, ecc., che possono ridurre la capacità portante, l'eliminazione di archi, solai, muri, ecc. che può produrre forze non equilibrate, l'incremento di altezza della struttura, che porta ad un aumento di peso, l'effettuazione di scavi, gallerie, edifici adiacenti, che può ridurre la capacità portante del suolo. Lo schema dovrebbe considerare, in modo semplificato o in modo più completo, l'interazione fra le strutture e il suolo.

I dissesti nelle strutture si producono quando una o più azioni inducono tensioni che superano la resistenza del materiale. La tipologia e l'evidenza dei dissesti è legata al tipo delle azioni e dei materiali: quelli fragili si rompono senza deformazioni evidenti, mentre materiali duttili mostrano notevoli deformazioni prima del collasso.

I dissesti, ed in particolare le lesioni, non rappresentano necessariamente una situazione di pericolo; quando le lesioni sono prodotte da azioni indirette, come ad esempio cedimenti del suolo ormai assestati, le lesioni stesse riducono le tensioni che le hanno prodotte e consentono in genere di trovare una nuova configurazione.

Dissesti possono prodursi anche negli elementi non strutturali, come ad esempio nei tramezzi, per effetto delle deformazioni d'insieme.



3.3 Caratteristiche dei materiali e processi di degrado

Le caratteristiche dei materiali (in particolare la resistenza), che sono alla base di qualsiasi analisi strutturale, possono peggiorare in seguito a processi di degrado prodotti da azioni chimiche, fisiche o biologiche. Il livello di degrado dipende dalla tipologia dei materiali e dalle loro caratteristiche originarie (la porosità, ecc.) nonché dalla protezione delle superfici e dalla manutenzione. Benché l'aspetto visibile del degrado si manifesti generalmente sulla superficie, così da essere immediatamente percepito da una semplice ispezione (efflorescenze o aumento della porosità, ecc.), vi sono processi di degrado che possono essere individuati solo mediante prove più sofisticate (come ad esempio l'attacco del legno da parte delle termiti).

Il degrado dei materiali, prodotto da azioni chimiche, fisiche e biologiche, può essere accelerato quando queste azioni vengono incrementate (ad esempio con l'inquinamento, ecc.). Le conseguenze del degrado sono il deterioramento delle superfici, la perdita di materiale e, dal punto di vista meccanico, la riduzione della resistenza. La stabilizzazione delle caratteristiche dei materiali e quindi la loro protezione è perciò un aspetto importante per la conservazione delle costruzioni storiche; la manutenzione programmata diviene una attività essenziale perché spesso è possibile prevenire mentre recuperare qualità perdute è spesso difficile, incerto o addirittura impossibile.

3.4 Azioni agenti sulla struttura e sui materiali

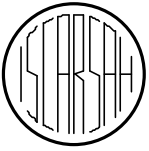
Le azioni sono rappresentate da ogni agente (forze, spostamenti, accelerazioni, ecc.) che produce sollecitazioni e deformazioni nella struttura e fenomeni (chimici, biologici, ecc.) che modificano le caratteristiche dei materiali, riducendone la resistenza. Le azioni originarie, che hanno agito dall'inizio fino dal completamento dell'opera, così come i carichi e l'ambiente, possono essere state modificate nel tempo; queste modificazioni possono essere fonte di dissesto e degrado. Le azioni sono di natura molto diversa con effetti molteplici sulle strutture e sui materiali. Spesso più di un'azione influenza il comportamento della struttura e dei materiali; queste azioni e le loro modifiche devono essere identificate chiaramente prima di decidere il tipo di intervento.

Le azioni possono essere classificate come segue:

I) Azioni meccaniche: sono quelle che agiscono sulle strutture e producono sollecitazioni (o tensioni) e deformazioni nel materiale; da queste azioni dipendono schiacciamenti, lesioni, distacchi ecc. Le azioni meccaniche sono di tipo statico o dinamico.

I.1) Azioni statiche. Le azioni statiche possono essere di due tipi:

I.1.1) Azioni dirette (forze applicate). Consistono in carichi applicati come i pesi propri ed i carichi accidentali. La modifica e principalmente l'aumento dei carichi è fonte di incremento nelle sollecitazioni e di possibili dissesti nelle strutture.



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

In alcuni casi, anche la diminuzione del carico o la rimozione di elementi strutturali può essere fonte di dissesti, come ad esempio l'eliminazione di una campata in una serie di archi o la riduzione di un peso in una spalla, che sbilancia la spinta di un arco o di una volta.

I.1.2) Azioni indirette (deformazioni imposte). Consistono in spostamenti imposti al bordo della struttura, come quelli prodotti da cedimenti del suolo, o in deformazioni prodotte all'interno dei materiali, come le deformazioni termiche, il rilassamento del ferro, la viscosità delle malte, ecc. Queste azioni, che possono variare con continuità o ciclicamente, producono forze solo se l'iperstaticità della struttura impedisce agli spostamenti e alle deformazioni di avvenire liberamente.

L'azione indiretta più importante e sovente maggiormente dannosa è quella prodotta dai cedimenti del suolo (alterazione della falda, scavi, ecc.); gli effetti possono essere lesioni, fuori piombo, ecc.

Alcune azioni indirette sono di natura ciclica, così come le variazioni di temperatura ed alcuni movimenti del suolo dovuti a variazioni stagionali delle falde; gli effetti prodotti in genere sono anche essi ciclici, ma a volte è possibile che si producano deformazioni progressive, in quanto in ciascun ciclo si forma una piccola alterazione permanente della struttura.

Il gradiente di temperatura tra le superfici esterna e la parte interna di un materiale produce deformazioni differenziali e quindi sollecitazioni che possono essere causa di micro-fessurazioni, le quali possono accelerare i fenomeni di degrado.

Azioni di tipo indiretto possono anche essere prodotte dalla riduzione progressiva di rigidità (indebolimento, degrado, ecc.) di alcuni elementi di una struttura iperstatica, modificando la distribuzione delle deformazioni e producendo quindi una redistribuzione delle sollecitazioni.

I.2) Azioni dinamiche. Le azioni dinamiche corrispondono ad accelerazioni indotte in una struttura per effetto di terremoti, vento, uragani, macchine vibranti, ecc.

L'azione dinamica più significativa è di solito quella prodotta dai terremoti. L'intensità delle forze prodotte dipende da diversi parametri, tra cui principalmente l'intensità dell'accelerazione, le frequenze proprie della struttura e la capacità di dissipare energia. L'effetto di un terremoto dipende non solo dalle forze indotte durante l'evento, ma anche dalla sequenza di terremoti precedenti che possono avere prodotto deformazioni permanenti e progressivamente indebolito la struttura.

II) Azioni fisiche, chimiche, e biologiche. Queste azioni, di natura assai diversa rispetto a quelle prima descritte, agiscono sui materiali e possono modificarne le proprietà, producendo diversi tipi di degrado ed in particolare riduzione della resistenza.

Le proprietà dei materiali, in effetti, si modificano in maggior o minor grado, nel tempo, secondo processi naturali tipici di ciascun materiale, come l'indurimento ritardato delle malte di calce, la lenta evoluzione dei fenomeni degrado, la carbonatazione dei conglomerati, ecc. Queste azioni possono essere influenzate e accresciute dalla presenza di acqua (pioggia, umidità, acqua di falda, cicli di bagna ed asciuga, crescita di microrganismi, ecc.), dalle variazioni di temperatura (espansione e contrazione, azione del gelo, ecc.) e dalle condizioni micro-climatiche (inquinamento, depositi sulla superficie,



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

modifiche della velocità del vento prodotte dalla costruzione di strutture adiacenti, ecc.). Il fuoco può essere considerato come un estremo incremento di temperatura.

Nei metalli l'azione più comune è l'ossidazione, in genere visibile sulla superficie; nei rinforzi metallici posti all'interno di un materiale l'ossidazione può essere rilevabile attraverso effetti collaterali, quali la frattura e la scheggiatura del materiale che contiene il rinforzo metallico.

Il deposito di sostanze inquinanti e la migrazione di acqua o altri agenti attraverso il materiale può essere causa di degrado.

Nel legno possono aversi agenti biologici attivi in zone non facilmente ispezionabili come gli attacchi delle termiti e dei funghi.

4 DIAGNOSI E VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

4.1 Aspetti generali

La diagnosi e la valutazione della sicurezza della struttura sono due fasi consecutive e correlate, su cui si basa la valutazione della necessità e dell'estensione degli interventi. Se queste non sono eseguite correttamente, le decisioni rischiano di essere arbitrarie: un giudizio basato su dati poco attendibili avrà come conseguenza interventi più cautelativi e quindi più invasivi, o livelli di sicurezza inaffidabili.

La valutazione della sicurezza è basata su metodi sia qualitativi (documentazione, osservazione, ecc.) sia quantitativi (indagini, analisi numeriche, ecc.) tenendo conto dell'influenza dei fenomeni in atto sul comportamento strutturale.

La valutazione della sicurezza è affetta da due tipi di problemi:

- l'incertezza insita nei dati (azioni, resistenze, deformazioni, ecc.), nelle ipotesi, nei modelli, ecc;
- la difficoltà di rappresentare matematicamente i fenomeni reali con modelli adeguati alla complessità delle strutture esistenti.

Appare ragionevole, quindi, adottare approcci diversi, ciascuno dei quali può dare un contributo autonomo ma, combinati tra loro, fornire il migliore "verdetto" possibile in base alle conoscenze e ai dati disponibili.

Nella valutazione della sicurezza è necessario includere alcune indicazioni, anche se solo qualitative, sull'affidabilità delle ipotesi adottate e sul risultato ottenuto, nonché sulla cautelatività della soluzione proposta.

Le normative e i codici attuali si cautelano mediante l'uso di coefficienti di sicurezza che tengono conto di varie indeterminazioni; tuttavia mentre ciò può essere appropriato nelle strutture nuove, dove la sicurezza viene aumentata con incrementi modesti nella dimensione delle membrature e dei costi, non altrettanto può dirsi per le strutture storiche dove l'incremento della resistenza può comportare alterazioni profonde alla concezione originaria ed al valore storico.



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

È necessario dunque adottare un approccio più flessibile, nel quale le calcolazioni non siano l'unico parametro di giudizio, calibrando gli interventi in relazione all'effettivo comportamento strutturale in un giusto equilibrio tra i requisiti di sicurezza ed il principio di minimo intervento.

Il giudizio sulla sicurezza di una struttura è basato sull'analisi critica dei risultati emersi dalle tre procedure che saranno discusse di seguito, tenendo presente che l'approccio qualitativo gioca un ruolo tanto importante quanto l'approccio quantitativo.

Occorre ricordare inoltre che i fattori di sicurezza stabiliti per edifici nuovi tengono conto di molte incertezze connesse alla realizzazione; negli edifici esistenti queste incertezze a volte possono essere ridotte perché il reale comportamento della struttura può essere osservato e monitorato. Se effettivamente i dati sono più affidabili, la riduzione di alcuni coefficienti di sicurezza non comporta necessariamente una effettiva riduzione della sicurezza; in certi casi, tuttavia, i dati possono essere più incerti per cui, al contrario, i coefficienti di sicurezza devono essere aumentati: su questi aspetti torneremo nei paragrafi 4.3.1 e 4.3.4.

4.2 Identificazione delle cause (Diagnosi)

La diagnosi consiste nell'identificare le cause dei fenomeni di dissesto e degrado, sulla base dei dati acquisiti, seguendo sostanzialmente tre procedure:

- Analisi storica (documenti, ecc.)
- Analisi qualitativa (osservazione, ecc.)
- Analisi quantitativa (indagini, modelli matematici, ecc.)

La diagnosi è spesso una fase difficile: i dati disponibili, di solito, si riferiscono agli effetti, mentre è la causa, o più spesso le molte cause concomitanti, che devono essere determinate. Questo è il motivo per cui l'intuizione e l'esperienza sono componenti essenziali nella diagnosi. Una diagnosi corretta è indispensabile per una valutazione appropriata della sicurezza ed una decisione razionale sulle misure da adottare.

4.3 Valutazione della sicurezza

4.3.1 Il problema della valutazione della sicurezza

La valutazione della sicurezza è il successivo passo per completare la fase diagnostica.

Mentre l'oggetto della diagnostica è identificare le cause di dissesto e degrado, la valutazione della sicurezza deve decidere se i livelli di sicurezza sono accettabili o meno in base all'effettivo stato della struttura e dei materiali. La valutazione della sicurezza è, quindi, un passo essenziale nel progetto di restauro perché con essa si decide se sono necessari interventi e la loro entità.



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

La valutazione della sicurezza rappresenta una fase difficile perché i metodi di analisi strutturale, usati per le nuove costruzioni, possono non essere accurati ed affidabili per le strutture storiche e portare quindi a decisioni inappropriate. Questo è dovuto a molti fattori, come: la difficoltà di comprendere propriamente la complessità di un edificio antico o di un monumento, le incertezze riguardo le caratteristiche dei materiali, l'influenza incerta di fenomeni pregressi (per esempio cedimenti del suolo), la conoscenza imperfetta di modifiche e riparazioni eseguite nel passato, ecc.

Un approccio puramente quantitativo, basato su modelli matematici, non può, quindi, essere la sola strada da seguire; occorre riferirsi anche ad approcci di tipo qualitativo (come nella diagnosi), basati sulla ricerca storica e sull'osservazione della struttura. Un quarto approccio basato su indagini specifiche può essere utile in alcune situazioni.

Ciascuno di questi approcci, elencati in seguito, può contribuire alla valutazione della sicurezza; ma è l'analisi congiunta delle informazioni ottenute da ognuno di essi che porta al giudizio più attendibile.

In conclusione, entrambi gli aspetti, quello oggettivo e quello soggettivo, devono essere tenuti in conto nel formulare il giudizio, soppesati in base all'affidabilità dei dati e delle ipotesi adottate. Tutto questo deve essere chiaramente esposto nel *Rapporto Esplicativo* di cui già si è fatto cenno.

L'architetto o l'ingegnere incaricati della valutazione di sicurezza di un edificio storico non possono quindi essere obbligati (anche da un punto di vista legale) a basare le loro decisioni solo sui risultati di calcoli, perché come già detto, ciò può rivelarsi inappropriato e pertanto poco attendibile.

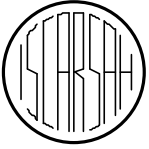
Nell'ambito del progetto occorre anche valutare il livello di sicurezza raggiunto dalla struttura in seguito agli interventi di rinforzo (vedi par. 5), in modo di valutarne il beneficio e calibrarne l'entità.

4.3.2 L'approccio storico

La conoscenza di quello che è accaduto nel passato può aiutare a prevedere il comportamento nel futuro costituendo un elemento importante nella valutazione della sicurezza che la struttura attualmente possiede. La storia è il più completo laboratorio sperimentale che si possa avere su scala reale e mostra come i tipi di struttura, i materiali, i collegamenti, i nodi, le aggiunte e le modifiche apportate dall'uomo abbiano interagito con le varie azioni, come i carichi, i terremoti, le frane, le variazioni di temperatura, l'inquinamento atmosferico, ecc., eventualmente alterando il comportamento originale della struttura, causando lesioni, fessure, schiacciamenti, fuori piombo, degrado, crolli, ecc. Compito dell'ingegneria strutturale è scartare informazioni superflue e interpretare correttamente i dati che riguardano la descrizione del comportamento statico e dinamico della struttura.

Un comportamento strutturale soddisfacente mostrato nel passato consente spesso di predire la sopravvivenza dell'edificio nel futuro anche se ciò non è una conseguenza automatica.

Quando una struttura lavora al limite della sua capacità portante e comportamenti fragili sono presenti (come per esempio un'elevata compressione nelle colonne), quando vi sono variazioni significative nella sua configurazione, quando vi sono azioni ripetute che generano un *accumulo del danno* come nel caso



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

di terremoti ripetuti o degrado progressivo del materiale, ecc. occorre attentamente valutare se la sicurezza del passato è ancora mantenuta nel presente.

4.3.3 L'approccio qualitativo

Questo criterio è basato sul confronto tra la condizione attuale di una struttura e quella di altre strutture simili delle quali il comportamento sia stato già compreso. L'esperienza maturata in base all'analisi ed al confronto del comportamento di strutture diverse può consentire estrapolazioni ed offrire riferimenti utili per la valutazione della sicurezza.

Questo approccio, noto in termini filosofici come processo induttivo, non è completamente attendibile perché la valutazione dipende più da una capacità di interpretazione personale che da una procedura rigorosamente scientifica. Ciò nonostante, questo può risultare l'approccio più adeguato, in quanto le incertezze inerenti il problema rendono solo apparentemente più rigorosi ed affidabili criteri deterministici basati su modelli matematici.

Avendo osservato il comportamento di diversi tipi di strutture in vari stadi di dissesto e degrado, causati da azioni diverse (terremoti, cedimenti del suolo, ecc.), ed avendo acquisito una conoscenza sulla loro staticità e durabilità, è possibile estrapolare questa conoscenza per prevedere il comportamento della struttura in esame.

L'attendibilità della valutazione dipenderà dal numero di strutture osservate e, perciò, dall'esperienza e dalla capacità degli individui coinvolti; una campagna di indagini ed un monitoraggio dei vari fenomeni può comunque aumentare l'attendibilità delle valutazioni.

4.3.4 L'approccio analitico

Questo approccio segue i metodi della moderna analisi strutturale che, sulla base di alcune ipotesi (teoria dell'elasticità, teoria della plasticità, schemi a telaio, ecc.) portano a conclusioni conseguenti a deduzioni strettamente logiche, basate su calcoli matematici. Tale approccio può essere definito di tipo deduttivo.

Le incertezze insite nelle caratteristiche dei materiali e nella rappresentazione del comportamento strutturale, oltre alle semplificazioni contenute nelle varie teorie, portano a risultati non sempre affidabili, anche molto lontani dalla situazione reale.

La difficoltà del problema è quindi nell'identificazione di modelli che, da un lato, siano significativi e descrivano adeguatamente sia la struttura che i fenomeni in gioco nella loro complessità e, dall'altro, rendano possibile l'applicazione delle teorie a nostra disposizione. È ovvio che la complessità del modello dipende anche dall'importanza del monumento.

I modelli matematici sono gli strumenti comunemente usati nell'analisi strutturale; essi devono riferirsi sia alla struttura originale, confrontando i dissesti teoricamente prodotti da diversi tipi di azioni col dissesto realmente osservato fornendo così un utile strumento per identificarne le cause, sia alla struttura così com'è attualmente per verificarne lo stato di sollecitazione.



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

I modelli matematici relativi alla struttura danneggiata e alla struttura rinforzata, aiuteranno a valutare il livello di sicurezza presente ed il beneficio conseguibile con gli interventi proposti.

L'analisi strutturale è uno strumento indispensabile; i risultati dei calcoli e dell'analisi anche quando non sono precisi, possono infatti indicare la distribuzione delle tensioni e le possibili aree critiche. I modelli matematici, da soli, non sempre riescono a garantire una valutazione attendibile della sicurezza. Interpretare i risultati e valutare correttamente i limiti nell'uso delle tecniche numeriche, richiede una profonda conoscenza scientifica. Ciascun modello matematico deve tenere in conto i tre aspetti descritti al par. 3, cioè lo schema strutturale, le caratteristiche del materiale e le azioni a cui la struttura è soggetta.

4.3.5 L'approccio sperimentale

Prove specifiche sulla costruzione possono permettere di valutare direttamente i margini di sicurezza, anche se spesso sono applicabili solo ad elementi strutturali singoli (come la prova di carico su un solaio, ecc.) e raramente all'intero edificio.

4.4 Il giudizio - Valutazioni sulla sicurezza

Il giudizio sulla sicurezza di una struttura è basato sui risultati dei tre (o quattro) procedimenti precedentemente descritti (il quarto approccio ha un'applicazione limitata).

Quando vengono evidenziati livelli di sicurezza inadeguati, occorre controllare se l'analisi abbia utilizzato o meno informazioni sufficientemente accurate e valori eccessivamente o insufficientemente cautelativi; ulteriori indagini potrebbero rendersi necessarie.

Essendo la sicurezza un fattore di natura probabilistica, quanto maggiori sono le incertezze, tanto più consistenti devono essere gli interventi. Più i metodi di ricerca e di analisi strutturale sono affinati e approfonditi, più l'approccio analitico diventa affidabile e quindi in grado di avere un ruolo preminente nella valutazione dei livelli di sicurezza. Resta indispensabile, tuttavia, seguire anche gli altri criteri per acquisire la piena comprensione del reale comportamento strutturale del monumento.

E' da evidenziare come il fattore tempo abbia un ruolo fondamentale nella sicurezza delle strutture: poiché quest' ultima, come già detto, è di natura probabilistica, più a lungo l'intervento viene procrastinato nel tempo, maggiore è la probabilità che si producano danni: scadenze per le decisioni devono quindi essere fissate.

I fattori che influenzano la determinazione del termine ultimo dipendono essenzialmente da tre tipi di fenomeni:

- processi continui (come per esempio processi di degrado e lenti cedimenti del suolo, ecc.) che possono ridurre il livello di sicurezza al di sotto dei limiti accettabili, così che devono essere prese adeguate misure prima che ciò accada;
- fenomeni di natura ciclica (variazione di temperatura, del contenuto di umidità, ecc.) che possono accelerare i fenomeni di degrado;



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

- fenomeni che possono accadere improvvisamente, (come terremoti, uragani, ecc.); la probabilità che questi si verifichino con determinata intensità aumenta col trascorrere del tempo, così che il livello di protezione può teoricamente essere collegato all'aspettativa di vita della struttura (per esempio, come ben noto, se si desidera proteggere un edificio dal terremoto per cinque secoli è necessario assumere accelerazioni maggiori di quelle richieste per proteggere lo stesso edificio per un secolo).

In alcune circostanze, il rispetto dei livelli di sicurezza, secondo norme in vigore nei diversi paesi, porterebbe ad interventi inaccettabili dal punto di vista del valore storico del bene.

In questi casi, previa dettagliata giustificazione dei motivi (vedi *Il rapporto esplicativo* del paragrafo seguente) può essere accettato di derogare da suddette norme trovando un giusto equilibrio tra le due esigenze (sicurezza e conservazione) quando queste divengano contrastanti tra loro.

In Italia questa linea è stata accettata sotto il nome di “miglioramento” cioè il procedere con interventi che migliorino il comportamento strutturale attuale senza, tuttavia, raggiungere i livelli di sicurezza previsti da altre norme vigenti.

5 SCELTA DEGLI INTERVENTI – IL RAPPORTO ESPLICATIVO

Le decisioni riguardanti la natura e l'estensione di ogni intervento saranno prese dal gruppo dei progettisti secondo un progetto unitario che valuti sia gli aspetti di stabilità strutturale sia quelli relativi alla conservazione dei valori culturali sociali ed economici dell'edificio.

Le scelte effettuate devono essere illustrate in un *Rapporto Esplicativo*, scritto in modo chiaro al fine di essere facilmente compreso da tutti gli operatori coinvolti nell'intervento di conservazione.

Nelle decisioni finali, le valutazioni qualitative dovranno avere un ruolo importante quanto quelle quantitative.

Il *Rapporto Esplicativo* includerà anche un commento sulle relazioni specialistiche effettuate (che saranno più approfondite e dettagliate), sintetizzandone il contenuto; sarà un'analisi critica, basata su ragionamenti strettamente logici, volti ad evidenziare sia l'attendibilità, sia la cautela che hanno caratterizzato le scelte e le decisioni.

Il *Rapporto Esplicativo* spiegherà ciò che non può essere definito con calcoli analitici, evidenziando le approssimazioni, l'affidabilità delle ipotesi, dei dati presi in considerazione ed i margini di sicurezza considerati nei vari stadi. Valuterà, inoltre, il livello di sicurezza del bene e, qualora questo non fosse sufficiente, evidenzierà gli interventi proposti per incrementarlo.

E' buona norma analizzare e confrontare differenti possibili soluzioni progettuali. Per ognuna, il *Rapporto* considererà i vantaggi e gli svantaggi rispetto ai differenti aspetti coinvolti: da quello della conservazione dell'autenticità a quello di possibili reintegrazioni, dall'uso di tecnologie tradizionali all'uso di tecnologie moderne e così via. In particolare andrà valutato il livello di sicurezza associato ad



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

ognuna delle soluzioni possibili. Questa analisi dettagliata rappresenterà la migliore garanzia che il progetto sia frutto di riflessioni e valutazioni approfondite.

Le scelte progettuali dovranno essere descritte dettagliatamente, evidenziando tutti i miglioramenti con esse conseguibili nel comportamento strutturale.

Le differenti proposte devono anche considerare i costi ed i benefici ad esse conseguenti: incrementare il livello di sicurezza può portare ad una perdita di valore culturale e viceversa.

E' indispensabile indicare, per ogni prescrizione, il livello di affidabilità dei dati di cui ci si è avvalsi e quindi i margini di sicurezza assunti.

Qualora l'applicazione degli ordinari codici di progettazione portasse ad interventi di consolidamento incompatibili con le esigenze proprie della conservazione dei beni storici, è necessario illustrare dettagliatamente la situazione spiegando i motivi per cui si intende derogare e quali siano i livelli di sicurezza che comunque si possono raggiungere. Un monitoraggio durante la fase realizzativa e nei tempi successivi, può contribuire a incrementare i margini di sicurezza.

Ogni intervento, soprattutto quelli necessari in caso di emergenza (ad esempio dopo un terremoto) devono prevedere soluzioni immediate e provvisorie che consentano di proteggere il manufatto da ulteriori danni nell'attesa che la soluzione definitiva sia individuata e messa in opera.

Nelle proposte progettuali si deve evidenziare se queste siano relative solo all'emergenza, o se devono rimanere come definitive.

La relazione deve anche illustrare le approssimazioni assunte rispetto ai dati utilizzati nelle varie fasi del processo progettuale; esse sono legate al grado di conoscenza della struttura esistente, alla natura dello schema strutturale assunto con i relativi punti critici, alla natura del modello matematico ad esso associato, alle caratteristiche dei materiali, alla natura dei carichi e delle altre azioni agenti sulla struttura, ecc.

Quando sussistono ampie incertezze e approssimazioni nei dati utilizzati o laddove esistono difficoltà ad individuare un modello matematico significativo per una struttura complessa, il livello di affidabilità delle analisi quantitative può essere assai basso. In questi casi è necessario chiarire, con il supporto di valutazioni qualitative, la cautela assunta nelle verifiche e l'opportunità o meno di integrare le indagini.

Spesso si possono quindi avere due alternative: procedere sulla base dei dati disponibili oppure posticipare le decisioni e, approfondendo le indagini sulle strutture, ottenere informazioni più affidabili rendendo così possibile la riduzione degli interventi necessari a vantaggio della conservazione. I costi e i benefici delle due alternative devono però essere dettagliatamente considerati; infatti non sempre un approfondimento di indagini porta a nuove conoscenze e ritardare gli interventi può, talvolta, incrementare i rischi.

ALLEGATO



DISSESTI STRUTTURALI, DEGRADO DEI MATERIALI E CRITERI D'INTERVENTO

1 Introduzione

1.1 Aspetti generali

Le specifiche caratteristiche costruttive, lo stato di degrado e le particolari esigenze dei singoli monumenti determinano situazioni estremamente diverse tra loro; gli interventi di restauro e conservazione devono pertanto essere concepiti, di volta in volta, per il caso specifico e devono scaturire da approfondite indagini condotte sul campo e in laboratorio. Con l'adozione di soluzioni opportune è possibile ritardare, anche notevolmente, il processo di degrado delle strutture.

Spesso il patrimonio storico ha subito interventi inappropriati come quelli effettuati usando cemento *Portland* o cemento armato che hanno generato, con il passare del tempo, ingenti danni; in questi casi è talvolta necessario rimuovere questi materiali incongrui.

Ricostruzioni in linea di massima devono essere evitate anche se in alcuni casi può rendersi necessario reintegrare parti della struttura per assicurarne la stabilità, la conservazione (impermeabilizzazione, ecc.) o l'integrità architettonica.

Tutti gli interventi di conservazione eseguiti sui materiali devono essere preceduti da esami scientifici, campionamenti, analisi e ricerche. Solo quando si siano stabilite le cause del degrado è possibile individuare la migliore procedura tecnica e i migliori materiali per la conservazione.

I materiali e le tecniche individuati in base ai risultati delle ricerche devono essere testati in ambiente controllato (possibilmente in laboratorio) e *in situ*. Solo quando i risultati delle prove saranno positivi si potrà procedere, garantendo così l'efficacia del risultato.

Quando sono utilizzati nuovi prodotti devono essere analizzati tutti i possibili effetti collaterali negativi riguardanti la compatibilità, la durabilità ecc. .

Se risulta necessario procedere con consolidamenti, devono essere rispettate il più possibile le tecniche costruttive originali, compatibilmente con le condizioni di sicurezza delle strutture e delle loro fondazioni.

Nell'individuazione dei criteri di intervento occorre preventivamente capire se eventuali deformazioni che la struttura ha subito siano stabilizzate o meno. Se le deformazioni risultano stabilizzate è sufficiente accertare se esse abbiano compromesso o meno la stabilità e eventualmente ristabilirla mediante opportune misure (incatenamenti, impernature, iniezioni, staffature, ecc.)

Deformazioni non stabilizzate sono spesso causate da assestamenti del suolo e richiedono interventi più complessi (vedere il prossimo paragrafo).



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

Martinetti o sistemi simili possono essere adottati per recuperare parte delle deformazioni, ponendo però particolare attenzione agli sforzi da loro indotti onde evitare nuovi danni.

Quando gli interventi hanno un'evidenza esteriore occorre valutare l'impatto visivo sul monumento.

La tecnica dello smontaggio e ricostruzione di strutture fortemente deformate o pericolanti, può essere accettata in casi eccezionali e solo dopo aver accertato, da un lato, che non vi siano soluzioni alternative meno traumatiche, dall'altro, l'eventuale perdita di autenticità.

I seguenti paragrafi esaminano senza alcuna pretesa di completezza, per la quale si rinvia a testi specifici, alcuni dei problemi che più frequentemente possono presentarsi nelle strutture realizzate con i differenti materiali e i criteri generali per individuare gli interventi necessari.

1.2 Assestamenti del suolo

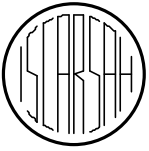
Gli assestamenti del suolo spesso non sono stabilizzati; in questo caso essi rappresentano la categoria più importante dei fenomeni in evoluzione, spesso molto complessi (in aggiunta al degrado dei materiali), che compromettono il corretto comportamento strutturale dei monumenti. In questi casi occorre individuare la tendenza del fenomeno valutandone le conseguenze future quali le sollecitazioni indotte, gli incrementi di inclinazioni, ecc.

Un monitoraggio è spesso necessario per conoscere l'evoluzione dei fenomeni nel tempo.

In generale si possono seguire tre criteri:

- eliminare le cause, riducendo la deformabilità del suolo (stabilizzazione del livello di falda, ecc) o riducendo le tensioni indotte dalla struttura (allargamento delle fondazioni, realizzazione di pali sotto le fondazioni esistenti ecc.) Questi interventi sono solitamente difficili; creando forti alterazioni alle strutture originali generano spesso perdite irreversibili del valore storico.
- eliminare (o ridurre) gli effetti, riducendo l'iperstaticità della struttura, creando giunti, cerniere, ecc. cosicché le deformazioni del suolo siano, almeno parzialmente, libere di svilupparsi, producendo così sforzi più contenuti. Questa opzione è difficilmente applicabile nei monumenti.
- incrementare la resistenza della struttura fino a livelli sufficienti non solo per resistere agli sforzi aggiuntivi indotti dalle deformazioni del suolo ma anche per dare una globale solidità e continuità all'organismo strutturale tale da contrastare gli effetti della disuniformità del suolo di fondazione. Questo obiettivo può essere raggiunto solo se l'evoluzione dei fenomeni è modesta e le conseguenti deformazioni e sollecitazioni indotte sono contenute entro valori modesti. Misure efficaci ed efficienti possono ottenersi con incatenamenti, cerchiature, staffature, parziali ricostruzioni di parti crollate o danneggiate, ecc. Questi interventi devono essere associati ad un sistema di monitoraggio per controllare se col tempo essi conservano la loro efficacia o debbano essere riconsiderati e incrementati.

2 Costruzioni in muratura



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

Il termine 'muratura' viene qui riferito alle costruzioni in pietra, mattoni e terra, (cioè *adobe*, *pisé*, mattone crudo, ecc.).

Le murature, e in particolare le strutture realizzate in terra cruda, sono spesso fatte di materiali che hanno una resistenza a trazione molto bassa e mostrano quindi facilmente lesioni o distacchi tra i vari elementi. Ciononostante, questi segni non sono necessariamente un'indicazione di pericolo poiché le strutture in muratura sono concepite per lavorare essenzialmente a compressione.

L'analisi preliminare delle murature deve individuare le caratteristiche dei componenti di questo materiale composito: le pietre o i mattoni (calcari, arenarie, cotti o seccati al sole ecc.) e il tipo di malta (cemento, calce, ecc.). È anche necessario conoscere come gli elementi sono legati tra loro, (giunti a secco, letti di malta, ecc.) e il modo in cui gli elementi sono geometricamente disposti.

Diversi tipi di indagini possono essere effettuate per accertare la composizione dei muri (indagini endoscopiche, ecc.).

La muratura con il giunto *a secco* è di solito realizzata con blocchi di buona qualità e resistenti a trazione cosicché, spesso, invece di lesionarsi avvengono in esso scorrimenti reciproci fra i conci.

Le strutture in muratura migliorano la propria stabilità se sono legate dalla presenza di solai e di tetti in modo tale da distribuire le forze laterali e assicurare la stabilità complessiva dell'edificio. È importante esaminare la disposizione di tali strutture e l'efficacia dei loro collegamenti.

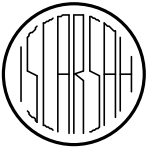
Nell'analisi delle strutture in muratura è importante individuare i differenti periodi di costruzione delle varie parti, perché le diverse caratteristiche possono influenzare il comportamento d'insieme.

La causa principale di dissesto statico grave o di crollo nelle murature è dovuta ai carichi verticali che producono fenomeni di schiacciamento, carico di punta negli elementi scollegati, collasso fragile, ecc. Queste situazioni sono particolarmente pericolose perché di solito sono precedute da deformazioni piccole e da segni poco evidenti.

Forze orizzontali importanti si producono di solito in zona sismica, nelle costruzioni alte, e in presenza della spinta di archi o volte. Esse possono diventare pericolose se non contrastate da altri elementi strutturali (muri pesanti, contrafforti, catene).

Particolare attenzione deve essere posta ai muri di grande spessore la cui tessitura comprende in genere materiali di natura diversa: è il caso delle murature *a sacco* il cui nucleo è spesso di qualità scadente. Questo non solo ha una capacità portante ridotta, ma può produrre anche spinte laterali sulla muratura dei paramenti perimetrali, rendendo il muro potenzialmente instabile e riducendone la capacità portante. È indispensabile quindi valutare se i paramenti ed il riempimento sono ben collegati: se lavorano insieme o separatamente.

Le tensioni di compressione prossime alla resistenza dei materiali possono causare, come primo segno di dissesto, fessure verticali, e quindi lesioni, rigonfiamenti e deformazioni trasversali. Le compressioni per cui questi effetti divengono visibili dipendono dalle caratteristiche ed in particolare dalla fragilità



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

del materiale. Gli effetti di cui si è fatto cenno possono svilupparsi molto lentamente (anni o decenni) in altri casi, assai rapidamente; sollecitazioni prossime alla resistenza limite rappresentano, comunque, un alto rischio di crollo anche se i carichi rimangono costanti.

Un'analisi della distribuzione delle tensioni è assai utile per individuare la causa dei dissesti; calcoli di prima approssimazione sono in genere sufficienti perché di solito le compressioni sono molto basse e, imprecisioni nella loro valutazione non risultano rilevanti. Un'ispezione accurata del quadro fessurativo può fornire un'indicazione dei percorsi degli sforzi all'interno della struttura.

Quando le sollecitazioni sono prossime alla resistenza della muratura è necessario, invece, eseguire un'analisi strutturale più accurata accompagnata da prove specifiche (prova con martinetto piatto, prove soniche, ecc.) per stimare in modo più affidabile la resistenza.

Forze laterali, contenute nel piano della parete, possono causare fessure diagonali o lo scorrimento tra blocchi di pietra. Forze agenti fuori dal piano o eccentriche possono causare separazione dei paramenti nelle murature a sacco o rotazione dell'intera parete attorno alla sua base. In questo caso, si possono verificare prima del ribaltamento lesioni orizzontali alla base.

Per quanto riguarda gli interventi di rinforzo si possono seguire diverse strade tra cui: stilatura dei giunti della muratura, consolidamento con iniezioni, rinforzo del muro con elementi verticali, longitudinali o obliqui, rimozione e sostituzione dei materiali degradati, demolizione e ricostruzione, parziale o totale, ecc.

Il consolidamento della muratura lesionata o degradata spesso si effettua mediante iniezioni di malte fluide, la cui miscela (calce, cemento, resine, prodotti speciali, ecc.) dipende dalle caratteristiche della muratura stessa. Particolare attenzione deve essere posta alla compatibilità fisica e chimica tra materiali originali e nuovi.

Il consolidamento con la tecnica delle iniezioni deve essere sempre accompagnato da indagini, preliminari ma anche di controllo finale, volte a dimostrare l'attuabilità e l'efficacia.

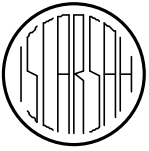
Cementi che contengono sali possono usarsi solo quando non vi siano rischi di produrre danni alle murature e in particolare alle superfici.

Nei muri costruiti con malta contenente gesso, a causa della reazione tra gesso e cemento, si producono sali che possono portare seri danni; in alcuni casi si pone il problema di affioramento di sali solubili dalla malta che, come conseguenza, provocano efflorescenze sulla superficie della muratura in mattoni, particolarmente dannose quando vi sono intonaci storici o affreschi.

Oltre, o in alternativa al consolidamento della muratura con iniezioni, un intervento efficace per migliorare la capacità portante è rappresentato dalla cerchiatura (di un pilastro) o la staffatura (di una parete) per contrastare la dilatazione trasversale.

La protezione o consolidamento delle superfici prive di intonaco protettivo può essere effettuata con vari prodotti anche se questi si rivelano raramente veramente efficaci.

Gli archi e le volte sono gli elementi più caratteristici delle strutture in muratura; la curvatura produce una spinta alle imposte che, composta con le reazioni verticali ed i carichi, riduce od elimina del tutto i



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

momenti flettenti; si possono progettare così costruzioni con modesta resistenza a trazione, e addirittura prive di resistenza a trazione, come le murature realizzate con blocchi disposti a secco senza malta.

La capacità portante degli archi e delle volte è eccellente; i dissesti più frequenti sono prodotti dal movimento delle imposte che generano momenti flettenti e tensioni di trazione, con formazione di lesioni o apertura dei giunti.

Spesso nelle volte si osservano fessure sottili: di norma fisiologiche esse, invece, sono talvolta dovute ad una esecuzione scadente (mancanza di legante tra i blocchi, cattiva qualità dei materiali, ecc.), ad una geometria inappropriata in relazione alla distribuzione del carico, ad una resistenza inadeguata di catene o speroni che disposti a contrastare la spinta.

Quando il materiale con cui una volta è costruita ha resistenza molto bassa (come nelle strutture realizzate con pietre irregolari e malta abbondante) è possibile che porzioni nello spessore delle volte si distacchino, con conseguente possibile crollo progressivo.

Nelle strutture murarie arcuate o voltate, quando si modifica l'entità dei carichi (specialmente rilevanti carichi propri), deve essere attentamente valutata la relazione tra la nuova distribuzione delle sollecitazioni e la geometria della struttura.

Alcune tra le principali misure per rinforzare archi e volte sono: inserimento di catene, di solito poste al livello delle imposte nelle volte, o lungo i paralleli nelle cupole; costruzione di contrafforti; correzione della distribuzione dei carichi, ecc.

Edifici alti come torri, campanili, minareti, ecc., sono caratterizzati da elevate sollecitazioni di compressione e presentano problemi simili a quelli di pilastri e colonne. Inoltre, queste strutture sono spesso indebolite da collegamenti imperfetti tra i muri, e da modifiche come la creazione o l'eliminazione di aperture, ecc.

Tiranti orizzontali, catene e diaframmi, possono migliorare la capacità resistente ai carichi verticali.

Gli edifici alti sono particolarmente esposti alle azioni sismiche.

3 Strutture in legno

Il legno è stato usato in una ampia varietà di forme strutturali, tra cui strutture reticolari, strutture intelaiate, strutture composte di legno e muratura, per fornire un miglior collegamento e resistenza alle forze orizzontali.

Il suo comportamento strutturale è legato alla specie legnosa, alle caratteristiche della crescita, e alle modifiche indotte nei processi di lavorazione. Le analisi preliminari, spesso condotte mediante un semplice esame visivo, riguardano l'identificazione delle specie legnose, che sono differentemente suscettibili di attacco biologico, l'individuazione dello stato di conservazione nonché della resistenza di ciascuna membratura influenzata dalla presenza dei nodi.

La durabilità del legno è influenzata dai metodi di taglio, stagionatura e trasformazione del tronco in membrature. Le fessure longitudinali, parallele all'andamento delle fibre, dovute al ritiro per



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

essiccamento, non sono pericolose quando la loro dimensione è piccola. I funghi e l'attacco degli insetti, il cui sviluppo è legato ad un elevato contenuto di umidità ed alla temperatura, sono la fonte principale di degrado.

Il contatto con la muratura è spesso fonte di umidità. Ciò può accadere sia dove la muratura sostiene il legname, (come nell'incasso delle testate delle travi), sia dove il legname è stato usato per rinforzare la muratura. La scarsità di manutenzione dell'edificio o cambiamenti radicali nelle condizioni interne sono le cause più comuni di degrado del legname.

Poiché il degrado e l'attacco degli insetti non sempre sono visibili dalla superficie, si può rendere necessario un esame dell'interno dell'elemento in legno, utilizzando tecniche specifiche come le micro-perforazioni.

Prodotti chimici possono proteggere il legno dall'attacco biologico. Le teste delle travi dei solai e dei tetti, inserite nei muri sono suscettibili di degrado dovuto all'umidità e devono essere protette ma soprattutto aerate.

Quando si impiegano materiali di rinforzo o consolidanti, si deve verificare la loro compatibilità col legname della struttura. Gli interventi non devono impedire al legno di porsi in equilibrio con l'ambiente disperdendo la propria umidità.

Lo smontaggio ed il riassetto delle strutture in legno sono operazioni delicate che possono portare alla perdita di parte del materiale assemblato e quindi del valore storico.

Nelle strutture a telaio, o reticolari in genere, i nodi rappresentano i punti deboli che spesso occorre rendere più efficienti mantenendone però la duttilità e i gradi di libertà previsti in progetto.

4 Strutture in ferro ed acciaio

È necessario distinguere tra strutture in ghisa, ferro battuto ed acciaio. Le prime sono deboli a trazione e possono contenere autotensioni risultanti dal processo di forgiatura: la ghisa è un materiale fragile, ove si possono produrre fratture senza un margine di avvertimento. La sua resistenza, inoltre, è influenzata dalla lavorazione nella fonderia.

Il ferro e l'acciaio usati nelle costruzioni sono costituiti da leghe e la loro predisposizione alla corrosione dipende dalla composizione. La corrosione è accompagnata da un aumento di volume del materiale che può dare origine a sollecitazioni nei materiali associati: sono frequenti le rotture delle pietre e del calcestruzzo per effetto della corrosione di barre o staffe di ferro inserite all'interno.

Le zone più vulnerabili delle strutture in acciaio sono le connessioni, ove le sollecitazioni sono generalmente elevate, specialmente nei fori delle chiodature. I ponti o altre strutture sottoposte a carichi ripetuti possono essere soggetti a fenomeni di fatica. Nelle connessioni chiodate o bullonate è importante controllare l'insorgere di lesioni in corrispondenza dei fori.

L'analisi della frattura permette di stimare la vita residua della struttura.

La protezione contro la corrosione del ferro e dell'acciaio richiede, per prima cosa, l'eliminazione della ruggine dalle superfici (mediante sabbiatura, ecc.) e quindi la pitturazione della superficie con un



ICOMOS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND
RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE

prodotto adeguato. Le strutture in ferro o acciaio pesantemente danneggiate e deformate non possono di solito essere riparate. Il rinforzo di strutture deboli può spesso essere ottenuto con l'aggiunta di nuovi elementi, facendo particolare attenzione alle saldature.

5 Strutture in cemento armato

Il cemento armato e il cemento armato precompresso sono presenti in molti edifici moderni, ora riconosciuti di importanza storica. All'epoca della loro costruzione non vi era ancora una piena comprensione delle caratteristiche del nuovo materiale, così che oggi si possono presentare problemi di durabilità. I fenomeni di degrado più comuni riguardano la carbonatazione del calcestruzzo (che indurisce, ma diviene anche più fragile e può fessurarsi riducendo la sua capacità di proteggere l'acciaio) e la corrosione dell'acciaio. Il calcestruzzo esposto ai cloruri (specie in località marine) è particolarmente suscettibile di corrosione del ferro che, ossidandosi, aumenta di volume, spaccando il calcestruzzo stesso.

Per riparare un elemento in cemento armato degradato generalmente occorre eliminare il calcestruzzo deteriorato (con acqua in pressione, ecc.), rimuovere la ruggine dalle armature, aggiungere nuovi rinforzi e ricostruire il *copriferro*, spesso usando malte speciali.