

SALVATORE DI PASQUALE

APPLICAZIONI DELLA RICERCA SCIENTIFICA  
E DELLA TECNOLOGIA ALL'ANALISI  
ED AL CONSOLIDAMENTO  
DELLE STRUTTURE ARCHITETTONICHE

RELAZIONE GENERALE

Con questa relazione mi propongo due obiettivi: dare conto dei lavori presentati a questa sessione del congresso e tentare una panoramica sullo stato attuale delle ricerche, teoriche ed applicate, concernenti il problema del consolidamento statico negli interventi di restauro dei monumenti o di centri antichi.

L'estensione a questo ultimo ambito sembra oggi quanto mai opportuna per una serie di motivi, spesso tragici, che hanno spostato l'interesse dei ricercatori e degli addetti ai lavori su problematiche di carattere generale nelle quali il monumento, nella accezione corrente del termine, può anche non essere presente, mentre vi è tutto un tessuto urbano, modesto ma ricco di storia, degradato, fatiscente o, al limite, devastato da eventi sismici.

Ciò porta a considerare problemi verso i quali esiste una generale im-preparazione, per quanto concerne i metodi di analisi, e, conseguentemente, per quanto concerne le tecniche di intervento essendo queste, almeno in linea teorica, strettamente legate alla analisi intesa come reale conoscenza del fenomeno indagato; im-preparazione scientifica, tecnica e tecnologica a loro volta causate dal progressivo abbandono, presso le nazioni tecnologicamente più avanzate — se così si può dire — della antica prassi costruttiva legata all'uso di pietre, mattoni ed altri materiali poveri; non è un caso, infatti, che nelle nostre università le discipline che costituiscono il bagaglio corrente del tecnico non diano spazio alcuno a teorie e tecniche di costruzioni in muratura. Acciaio e cemento armato detengono il primato assoluto

oramai dai primi decenni del secolo e nulla lascia prevedere un cambiamento di direzione. Naturalmente non parlo dei casi clamorosi, e proprio per questo a tutti noti, nei quali il singolo progettista ha risolto brillantemente il problema di consolidare l'insigne monumento affidato alle sue cure, o, con mirabili imprese tecniche ha raddrizzato muri, ha spostato templi, ha rifatto, proprio in cemento armato o in acciaio, strutture e parti di monumenti crollati; parlo di una coscienza di massa, di un bagaglio minimo di conoscenze che ciascun tecnico dovrebbe possedere per affrontare problemi di ben più vasta portata: e gli interventi nei centri devastati dai sismi ne sono un esempio fondamentale proprio per l'estensione e la gravità dei danni prodotti.

Da questo punto di vista tutto è ancora da fare; e le ricerche in questo settore vanno incoraggiate e pianificate e vanno sostenute dai mezzi finanziari occorrenti ad una sperimentazione su grande scala, in modo da poter confrontare le ipotesi teoriche, ed i risultati dedotti, con il reale svolgimento del fenomeno indagato; l'indagine sperimentale trova qui, più che altrove, significati precisi: le nuove tecniche di intervento basate sull'impiego di resine epossidiche e collanti; quelle fondate sull'inserimento di micropali armati; quelle più varie miranti a conferire alla massa muraria capacità di resistenza a trazione mediante opportuni inserimenti di distorsioni, sono tutti procedimenti che non hanno ancora una precisa base teorica, ma che si configurano piuttosto come espedienti tecnici, opportuni a bloccare una situazione di dissesto, ma non del tutto giustificabili in sede teorica. Donde la necessità di affiancare a codeste sperimentazioni « al vero » una indagine sistematica che miri alla fondazione di una teoria generale per le strutture murarie. Teoria che appare da più parti in gestazione, pronta a muovere i primi passi, ma non ancora completamente definita così come siamo abituati per strutture in acciaio o in cemento armato.

Vero è, d'altra parte, che il più delle volte non è possibile estrarre da un'opera muraria « la struttura » nel senso convenzionale del termine poiché essa coincide con l'opera stessa; vero è che il più delle volte non è possibile ricorrere a quelle schematizzazioni che riconducono le strutture a schemi astratti di linee e simboli che ne fissano i vincoli poiché si ha a che fare con problemi tridimensionali nei quali tutte le dimensioni sono paragonabili tra di loro e nessuna delle tre è piccola di fronte alle altre come è richiesto, per esempio, nella teoria delle travi e delle lastre. Né si può tacere di quell'altro aspetto della questione, invero assai importante, che fa delle strutture murarie solidi costituiti da materiale eterogeneo, ben resistente a compressione e poco o nulla a trazione, con piani di debolezza in corrispondenza dei giunti se le malte sono poco resistenti, o con piani intersecantisi

di resistenza e zone intermedie poco resistenti se le malte sono buone e la pasta dei mattoni lo è meno.

Sono tutti aspetti, questi, che contribuiscono a complicare il problema ed a renderlo difficilmente abordabile con una teoria che abbia ambizioni di generalità; donde i tentativi, di cui dirò diffusamente più avanti, per affrontare questioni particolari vagamente somiglianti a problemi reali; donde ancora gli innumerevoli interventi, esemplari dal punto di vista tecnico, ma tuttavia privi di una base teorica chiaramente definita.

D'altra parte è anche possibile leggere quanto accade ai nostri giorni con ottica diversa; poiché infatti non è possibile attendere la risposta scientificamente rigorosa che dovrebbe essere prodotta da una teoria che ancora non esiste, è naturale che chi è chiamato ad intervenire sull'edificio dissestato, sia esso monumentale o no, debba fare ricorso ad espedienti tecnici ed a procedimenti di intervento, già collaudati altrove, o trasferiti dalla tecnica delle costruzioni in acciaio o in cemento armato al caso in esame ed opportunamente adattati, che gli consentano di risolvere rapidamente e con correttezza il problema; direi che questo modo di procedere trova la sua validità proprio nella storia del costruire, quando si riflette sul fatto che le teorie che spiegano i fenomeni strutturali non hanno mai preceduto il costruito ma ne sono state generate. E un intervento di consolidamento statico, appena intuito nelle sue linee essenziali, e non completamente giustificabile alla luce delle teorie scientifiche, non mi pare dissimile dall'intervento che ha prodotto lo stesso oggetto da restaurare, oggetto che noi non siamo in grado di giustificare con considerazioni teoriche per il semplice motivo che una teoria non c'è.

Ben si comprende, dunque, come sia difficile delineare una panoramica generale di un paesaggio i cui contorni sono appena delineati; le indagini sul comportamento dei materiali, le tecniche di intervento, le strutture e la loro interazione con i terreni di fondazione, le analisi diagnostiche e le terapie fondate sull'impiego delle resine sintetiche, sono aspetti particolari di una molteplicità che costituisce la problematica generale del fenomeno dei dissesti. Tuttavia mi pare possibile abbozzare questa prospettiva, seppure incompleta e certamente ampliabile, delineando alcuni temi che appaiono abbastanza significativi e nei quali mi pare si possano riassumere le ricerche che negli ultimi anni si sono effettuate in questo settore. Nel seguito esporrò questi temi secondo una successione che non ha altra logica che quella, presunta, di dare un ordine al problema trattato; trarrò poi alcune conclusioni che non sembrano estranee ai contenuti delle carte del restauro.

## 1. Le ricerche sui materiali e sulle strutture murarie

I materiali lapidei, naturali ed artificiali, con le strutture che da essi hanno origine, costituiscono ovviamente l'oggetto principale delle ricerche teoriche. Naturalmente si tratta di ricerche che hanno come obiettivo la definizione di modelli fisico-meccanici atti a dare ragione del loro comportamento rispetto agli agenti esterni che qui interessano, vale a dire essenzialmente forze e variazioni termiche.

A queste ricerche vanno affiancate quelle sperimentali su campioni di materiali, o su modelli di strutture, o al vero, mediante le quali si ottengono dati essenziali per il controllo delle teorie elaborate.

Per quanto possa apparire lecito distinguere tra materiali e strutture, va rilevato che anche l'elemento costituente primo delle strutture, pietra o mattone che sia, ha una sua struttura che ne regola il comportamento; per questo motivo qui non si fa distinzione tra i due argomenti, che vengono trattati parallelamente potendosi trasferire ricerche e metodi, specificamente individuati, dall'uno all'altro.

I materiali lapidei, come i terreni, hanno scarsa o al limite nessuna capacità di resistere a sforzi di trazione; e le strutture murarie che da essi traggono origine hanno in più la complicazione della malta, materiale con caratteristiche diverse, se questa c'è, con dubbie resistenze a trazione o, in caso di sua assenza, la certezza di non poter resistere se non a sforzi di compressione. Anche a voler prescindere dalla composizione interna del materiale, per sua natura eterogeneo ed anisotropo, uno studio teorico del materiale muratura e delle strutture murarie presenta tali gradi di incertezza e di aleatorietà da rendere illusori i risultati conseguiti; i problemi sono estremamente complessi e le soluzioni ottenibili risentono tutte delle inevitabili ipotesi semplificative che occorre introdurre; per questo motivo la formulazione del problema deve poggiare su di un chiaro schema meccanico il più possibile aderente alla realtà o, comunque, governato da ipotesi semplificative che diano luogo a soluzioni il cui grado di sicurezza sia indiscutibile: e tale è, ad esempio, l'ipotesi che considera nulla la resistenza a trazione.

Naturalmente rimane insoluto il problema di come valutare le caratteristiche meccaniche di muri o strutture più o meno correttamente eseguiti, di come tener conto di giunti non sempre fatti a regola d'arte, di come considerare il riempimento che talvolta è contenuto tra parametri murari e così via.

Sono problemi, questi, probabilmente insolubili in sede di fondazione teorica di un metodo di analisi; il quale, seppure condizionato da pesanti

ipotesi, sembra tuttavia costituire guida indispensabile e conforto irrinunciabile per chi deve concretamente operare; e in questa ottica mi pare si possano inquadrare i recenti studi che si vanno compiendo sul comportamento delle strutture murarie. La necessità di avere un riferimento preciso nella questione della diagnosi dei dissesti, è premessa indispensabile per un corretto intervento di consolidamento; ed il riferimento preciso ed universalmente valido non può che derivare da una formulazione teorica corretta, che tenga conto dell'effettivo comportamento dei materiali che la costituiscono e del modo con cui essi sono stati lavorati e messi in opera, anche se, per i motivi precedentemente delineati, occorre una grande oculatezza ed una notevole esperienza per poter asserire che il metodo individuato è quello che realmente risponde allo scopo.

Da questo punto di vista è chiaro che l'analisi strutturale, così avanzata per i problemi della moderna ingegneria, non ha dato grande spazio alle murature; tanto che se ne può tracciare rapidamente un profilo di sviluppo storico.

A partire dal celebre saggio di C. A. Coulomb, che data 1773 e dalla successiva elaborazione applicativa data dal Mery nel 1840 su precedenti idee di Moseley e Navier il problema della statica delle strutture murarie dovrà attendere più di cento anni prima di essere rimesso in discussione; e si tratta, come tutti sanno, prevalentemente dell'arco in muratura.

Solo intorno agli anni cinquanta di questo secolo il problema viene ripreso ed affrontato con un metodo più congeniale; i tentativi sviluppati intorno agli anni venti per adattare la teoria delle strutture elastiche al problema dell'arco in muratura non ebbero molto seguito per deficienze implicite nella ipotesi di base consistente nel considerare perfettamente elastica la struttura sotto la sola condizione di avere una curva delle pressioni interamente contenuta nel nocciolo centrale d'inerzia, e nel ritenere comunque validi i risultati anche se il poligono funicolare risultava « contenuto » nella forma dell'arco.

Il punto debole di quei tentativi era, naturalmente, non tanto nel considerare elastico il materiale muratura, che tale esso è se sollecitato entro i giusti limiti, quanto nel ritenere valide soluzioni caratterizzate da curve delle pressioni che in qualche punto della struttura risultassero incidenti sulle sezioni in punti esterni ai noccioli: in tal caso, infatti la soluzione è soltanto equilibrata ma non congruente, ovvero si tratta di soluzioni ottenibili direttamente con la statica dei corpi rigidi.

La svolta degli anni cinquanta è determinata dalla comparsa del calcolo a rottura e delle sue crescenti applicazioni all'analisi strutturale; i teoremi dell'analisi limite, che si adattano egregiamente alla determinazione

del carico di collasso di archi in muratura, sembrano costituire la logica ripresa di un discorso che iniziato in pieno medio evo, attraverso i successivi contributi di Villard de Honnencourt, Leonardo, L. B. Alberti, Blondel, Borra, e tanti altri, doveva approdare proprio alla fondamentale memoria di C. A. Coulomb.

Se si eccettuano gli studi teorico sperimentali di A. J. S. Pippard, E. Tronter, L. Chitty e R. J. Ashby, effettuati intorno agli anni 1936-38, la prima applicazione del calcolo a rottura agli archi in muratura è del 1952, ad opera di A. Koocharian, che lavora nell'ambiente di D. C. Brucker e W. Prager; questi ultimi, riprendendo una idea di Coulomb, proporranno un criterio di rottura che oggi viene spesso impiegato nell'analisi limite delle strutture murarie e che viene detto, appunto, di Coulomb, Prager e Drucker; quattordici anni dopo J. Heyman pubblica un saggio sulla statica delle cattedrali gotiche, cui farà seguito una serie di note nelle quali, all'affinamento della indagine teorica, corrispondono concrete applicazioni di notevole interesse metodologico, dal restauro della cattedrale di Ely, al consolidamento di alcuni ponti di Telford. Le note scientifiche di J. Heyman, che precedentemente, nel 1972, aveva pubblicato una edizione critica del saggio di Coulomb, costituiscono oggi il riferimento preciso per chi si accinga allo studio statico delle murature; ne sono il logico punto di partenza, come hanno recentemente mostrato V. Franciosi ed R. K. Livesley, quando si voglia ad esempio tener conto dell'attrito nel calcolo a rottura degli archi.

In questa direzione di ricerca vanno anche segnalati i contributi di Ch. Massonet e M. Save che dedicano un capitolo del loro trattato al problema dell'arco in muratura; una segnalazione particolare merita lo studio di H. Joway sulle applicazioni del calcolo a rottura alle cattedrali gotiche.

L'analisi delle volte gotiche con i metodi classici della teoria strutturale è stato invece svolto dallo stesso J. Heyman e da I. Segger in una tesi di dottorato ad Aachen; in questi studi è stata applicata con successo la teoria delle volte sottili — codificata intorno al 1930 dagli studi di Pücher, Finstenwalder e Flügge — allo studio dei complessi di volte che coprono alcune delle più famose cattedrali gotiche del nord Europa, da Colonia, a Liegi, a Parigi, a Reims.

L'altra grande direttrice di ricerca, che nasce praticamente negli stessi anni, assume come obiettivo la formulazione del problema teorico dell'equilibrio di un mezzo continuo, omogeneo o non, costituito da parti elementari mutuamente legate da vincoli unilaterali, in grado cioè di esplicitare reazioni il cui segno è determinato dal tipo di vincolo (e qui si intravede il solido murario, non reagente a trazione); si tratta essenzialmente del problema di base nel quale non è precisata la forma della struttura: alle classiche equa-

zioni della teoria della elasticità si aggiungono, in questo caso, disequazioni che ne limitano la validità alle regioni spaziali in cui i vincoli possano esplicitare le proprie reazioni; queste ricerche estremamente complesse hanno sostanzialmente per obiettivo la definizione di modelli di comportamento e la messa a punto di specifiche tecniche computazionali.

La complessità del problema, pur se schematizzato e ridotto allo studio di un modello, sta nel fatto che la sua formulazione è non lineare, nel senso che non tutti gli elementi che costituiscono la struttura sono effettivamente impegnati dalle forze esterne ipotizzate e, naturalmente, non si sa quali siano gli elementi attivi.

Vale forse la pena qui spendere qualche altra parola per chiarire il significato del problema; una struttura muraria determinata nella forma, nei vincoli e nelle azioni esterne può essere vista, ad esempio, come problema di equilibrio delle sue parti costituenti (ad esempio pietre) e di congruenza delle loro deformazioni.

Il fatto che le parti costituenti siano semplicemente a contatto tra di loro, ad esempio senza malta o con malta scarsamente resistente, implica, nella versione analitica del problema, la non conoscenza delle superfici su cui il contatto avviene ed attraverso le quali si sviluppano azioni e reazioni.

Ciò equivale a dire che, in un certo senso, la struttura che corrisponde ad un assegnato sistema di carichi non è quella definita dalle sue forme esteriori, ma incognita e dipendente dai carichi. Ed è questa l'essenza del problema delle strutture murarie: la non coincidenza della struttura apparente con la struttura resistente.

Nel linguaggio convenzionale della teoria delle strutture il problema delle murature così posto diventa un problema di equilibrio di solidi a vincoli unilaterali o un problema di contatto; e, ancora una volta, un primo approccio può essere fornito dall'analisi elastoplastica in cui primeggiano i lavori di W. Prager, Koiter ed J. Oden.

Naturalmente la non linearità del problema conduce a formulare algoritmi risolutivi che si appoggiano a specifiche tecniche computazionali che qui non possono essere neanche richiamate; basterà solo accennare al fatto che si tratta sempre di metodi iterativi elaborati sul classico metodo di Newton-Raphson.

Un altro approccio al problema così formulato è fornito dalla « complementarietà lineare », ovvero da sistemi di disequazioni (quelle che fissano il segno delle tensioni interne) variazionali in cui i funzionali energetici sono associati ad opportune condizioni di vincolo sulle tensioni; giova rammentare che, a differenza dei problemi classici dell'ingegneria strutturale nei quali il funzionale energetico è rappresentato dalla energia potenziale totale,

qui compare come più conveniente il funzionale dell'energia complementare, notoriamente espresso in termini di stress, sul quale è immediato assegnare condizioni (e in ciò si segue la via indicata da A. Haar e T. V. Karman per l'analisi dei corpi plastici e, appunto, dei mezzi granulari); sono notevoli in questo campo i recenti lavori di G. Majer e della sua scuola, e di G. e M. Romano. Vanno ancora segnalati, per l'interesse che hanno suscitato, i lavori di R. Frisch-Fay sulla stabilità di colonne in muratura, tema sul quale si era già cimentato G. Augusti; ed infine, per i possibili risvolti applicativi, il voluminoso lavoro teorico sperimentale di R. L. Barnett e P. C. Hermann sulla precompressione delle travi composte da conci sconnessi.

Personalmente ritengo che il problema delle strutture murarie possa essere inquadrato in una visione più semplice, e forse anche più generale, se si fa ricorso alla teoria degli stati di coazione, teoria sorta intorno ai primi anni di questo secolo, e base teorica secondo la visione di G. Colonnati, della teoria della plasticità. In questa sede non è possibile neppure delinearne i concetti fondamentali; posso solo accennare al fatto che essa è fondata sull'introduzione di distorsioni all'interno della struttura muraria, il cui scopo è di creare degli stati di coazione che la liberino dalle tensioni di trazione che essa non può sopportare; in un certo senso questa teoria è molto simile a quella della precompressione con la sola differenza che qui le distorsioni sono fittizie, non reali, e corrispondono esattamente alle fratture ed alle linee secondo le quali esse si instaurano nel solido murario.

Non ho neanche accennato al fatto che questi metodi, quando non siano riferiti ad elementi strutturali monodimensionali, implicano il ricorso alle tecniche di risoluzione numerica del continuo con il metodo degli elementi finiti; metodo recentemente comparso nella letteratura tecnica e praticamente incontrastato; ne ho dato una prima versione nel recente convegno della IASS del 1979 a Madrid trattando della stabilità della Cupola di S. Maria del Fiore, versione elaborata in seminari che ho avuto l'onore di tenere presso la Scuola di perfezionamento in Restauro dei Monumenti della Università di Napoli.

A queste indagini di natura teorica vanno aggiunte, per completare il quadro, quelle sperimentali affrontate per la prima volta da R. Mark nel 1970 su modelli di cattedrali gotiche realizzati anche con tecniche fotoelastiche; e quelle più recenti effettuate alla ISMES sul Duomo di Milano per avere un preciso riferimento nelle operazioni di consolidamento.

## 2. *Le tecniche di intervento strutturale*

Mentre è stato abbastanza facile tracciare una linea di sviluppo delle

moderne vedute nel campo dell'analisi strutturale delle murature, non altrettanto facile riesce tracciare la linea di sviluppo delle tecniche di intervento; e ciò per motivi che tutti possono comprendere e che possono essere riassunti nella constatazione che, se è lecito ed auspicabile che gruppi di studiosi dedichino la loro attenzione ai problemi teorici, ed il loro tempo, spesso molto lungo, non altrettanto lecito è sempre apparso, attendere la risposta teorica ad un determinato quesito prima di decidere il tipo di intervento. Direi anzi, e qui c'è tutta la storia dell'architettura a darmi ragione, che il procedimento teorico giustificativo di una determinata operazione architettonica è sempre posteriore alla operazione stessa; in altre parole, ad esempio, nessuno ha mai pensato di fondare un metodo di calcolo per le tensostrutture prima che queste fossero costruite. Analogamente mi pare si possa affermare che solo oggi, di fronte alla massiccia richiesta di interventi di consolidamento e di restauro di antichi edifici e monumenti, gli ambienti scientifici, quelli in cui viene elaborata la scienza, per intenderci, abbiano cominciato a nutrire qualche interesse per tali temi. Poiché d'altra parte restauri e consolidamenti si sono sempre fatti, probabilmente in tutte le epoche (anche senza le carte del restauro...) ed in tutti i luoghi del mondo, appare chiaro come le relative tecniche si siano sviluppate e perfezionate nel tempo, indipendentemente da una ricerca di base, che diciamo scientifica, avente obiettivi di generalità. Né mi pare si possa tacere il fatto che il rapporto così instaurato tra scienza e tecnica sia quello corretto; è scienza del restauro anche tutto l'apparato tecnico che ne permette l'estrinsecazione e la realizzazione al di fuori di discorsi e parole, belle quanto si vuole, ma pur sempre parole: la suddivisione qui fatta è soltanto utile alla esposizione sommaria di una materia molto complessa i cui vari aspetti, nella problematica dei casi concreti, sono difficilmente scindibili.

Certamente il problema della individuazione delle cause del dissesto assume carattere preminente rispetto agli altri poiché solo da una corretta interpretazione delle cause, cui dovrebbe discendere come logica conseguenza il quadro fessurativo, è possibile delineare il tipo e le modalità di intervento. Non è questa la sede per discutere dettagliatamente il processo, peraltro il più delle volte soggettivo, che consente di risalire dalla fenomenologia del dissesto alle cause che lo hanno prodotto e conseguentemente alle modalità operative di intervento. I fenomeni di subsidenza, l'invecchiamento dei materiali, le vibrazioni prodotte dal traffico, le alterazioni fisico chimiche, i processi di affaticamento, l'aggressione da microorganismi, i difetti di progettazione, le variazioni termiche, sono solo alcuni dei fattori che possono produrre la crisi delle strutture architettoniche o di loro parti, ponendo così le premesse per l'intervento restaurativo; e i metodi di analisi sono altret-

tanto numerosi e specifici; e richiedono la messa in atto di procedimenti fondati sull'uso di apparecchiature che vanno dalla misura del movimento delle falde freatiche, delle accelerazioni, del decadimento delle caratteristiche meccaniche, delle variazioni termiche all'interno delle masse murarie. Limitando questa rassegna alle tecniche di intervento sulle strutture, quando non si tratti di sostituzioni di intere parti danneggiate, si può rilevare che la quasi totalità degli interventi effettuati in questi ultimi anni è basata sull'uso di due sistemi, quello del rinforzo della muratura danneggiata mediante micropali armati di calcestruzzo con additivi di speciali resine e quello del rinforzo mediante introduzione di vere e proprie ossature portanti che hanno lo scopo di alleggerire la funzione statica delle murature danneggiate. A questi va aggiunto il sistema della precompressione, felicemente applicato già nel 1954 da R. Morandi nel consolidamento delle murature dell'Arena di Verona e poi ripreso, assieme alla tecnica dei micropali, da J. Heyman per la cattedrale di Ely.

I pregi ed i difetti di tali sistemi, i motivi che possono far preferire l'uno all'altro, conducono a mio parere al problema centrale del restauro statico degli edifici monumentali: ed è questo il problema che andrebbe dibattuto in questa sede, perché le « carte del restauro », alle quali indubbiamente l'ICOMOS può portare un contributo, lasciano spesso troppo spazio ad interpretazioni soggettive e talvolta contrastanti. Non è ancora stato chiarito, infatti, in che misura l'intervento statico debba essere sostitutivo di parti danneggiate o semplicemente integrativo di parti che non sono più in grado di assolvere totalmente alle loro funzioni statiche.

In questa prospettiva si inquadra, peraltro, il problema non indifferente della salvaguardia del patrimonio storico-ambientale situato in regioni su cui grava l'ipoteca del rischio sismico; e l'altro problema, ancora più pressante di dare agli edifici già colpiti dai sismi e tuttavia non completamente distrutti, ma soltanto parzialmente danneggiati, i necessari presidi e le relative risorse strutturali. Che si debba intervenire su questi edifici mediante l'introduzione di sistemi strutturali in grado di assorbire le azioni orizzontali, non vi è dubbio; che queste azioni debbano essere riportate al suolo è altrettanto ovvio; che il suolo, il sottosuolo, e tutto il sistema di fondazioni debba essere accuratamente analizzato e rinforzato è ancora indubbio. Ma su come debbano essere fatte queste operazioni non vi è sempre chiarezza; sui limiti oltre i quali non è lecito andare per evitare che il singolo monumento o l'intero tessuto storico che lo contiene diventi altro da ciò che era, vi sono molti dubbi. Così come molti dubbi generò la ricostruzione delle grandi città europee devastate dalla guerra, assieme alle polemiche non ancora sopite: si vedano Coventry e Varsavia. Ma forse è questo il vero carattere

del Restauro; l'essere una disciplina in continua evoluzione, aperta ai continui apporti della scienza e della tecnica da un lato, chiusa dalle teorie artistiche dominanti, dall'altro.

D'altra parte ci si rende conto di come sia difficile stabilire un limite oltre il quale l'operazione restauro perde il proprio significato; per entrare nel vivo del problema e per avere un riferimento discorsivo penso ad un muro dissestato ed alle possibilità di intervento oggi offerte dalla tecnica. Non parlo naturalmente delle tecniche tradizionali, artigianali direi, con le quali si interveniva sostituendo le parti fratturate e le parti contigue con parti nuove — di materiale diverso secondo una certa visione critica del restauro, in modo da rendere visibile l'intervento —; parlo delle nuove tecniche che qui riassumo in quattro tipi diversi: micropali, l'imbibizione totale di resine sintetiche, inserimento di una ossatura portante in acciaio o in calcestruzzo armato, precompressione.

Con i micropali le funzioni portanti della muratura vengono integrate da una rete di elementi resistenti, variamente inclinati e di vario diametro, generalmente dell'ordine dei centimetri, con lo scopo di creare una sorta di scheletro resistente, diffuso e collaborante con la muratura. Con l'imbibizione — sotto vuoto secondo recentissime indagini sperimentali — di tutta la massa muraria o delle sole parti contigue alle linee di frattura, mediante speciali sostanze chimiche vagamente definite collanti e con nomi che rispondono a sigle e brevetti industriali con lo scopo di solidarizzare le parti fratturate e dare maggiore connessione alla massa muraria, dotandola anche di buona resistenza a trazione. Con l'inserimento di una vera e propria struttura portante, autosufficiente, le funzioni statiche della muratura vengono completamente annichilite. Con l'inserimento dei cavi da precompressione — ma l'operazione delle murature è sempre di post-tensione, del diametro di qualche millimetro se diffusi, di pochi centimetri se concentrati, si raggiunge lo scopo di dotare la struttura muraria di un efficace presidio contro le forze orizzontali oltre che di conferirle una maggiore stabilità.

L'esame di queste quattro possibili soluzioni mette bene in luce le differenze tra i risultati che si conseguono; beninteso risultati qui solo formali poiché è da ritenersi che dal punto di vista statico tutti rispondano allo scopo; né ha grande importanza il costo che ciascuno di essi comporta, anche perché spesso si ha notevole competitività.

Risultati formali che ciascuno potrà immaginare collocando il muro preso a pretesto per il discorso nel contesto del monumento o del vecchio edificio che meglio ricorda, per esperienza diretta o per semplice conoscenza: le differenze ci sono e sono anche palesi.

Di qui il diverso modo di risolvere i problemi, il diverso modo di



intendere il significato del termine restauro; modi sui quali alcuni si interrogano, e formulano risposte, diverse tra di loro, spesso contrastanti; e tra queste scelgono la soluzione che meglio risponde allo scopo; che poi, il più delle volte, si configura in vantaggio economico per la minor spesa che essa comporta.

Sono così condotto a spendere qualche parola conclusiva, prima di passare alla illustrazione delle note presentate a questo convegno, sul problema del rapporto costo-benefici, del rapporto tra il costo dell'operazione di consolidamento ed il beneficio che da questa si ricava; nella prassi ingegneristica di questi ultimi anni è invalso l'uso di valutare la vita nominale della costruzione e la sua durata economica. È evidente che nel caso di un'opera monumentale il rapporto sicurezza-durabilità, ovvero l'affidabilità dell'opera restaurata ha parametri di valutazione diversi da quelli di una nuova costruzione. Come ha acutamente osservato E. Giangreco, l'assenza di un carattere ripetitivo nelle operazioni di restauro ha una forte incidenza sui costi e, talvolta, condiziona drasticamente l'impiego di tecniche più appropriate dal punto di vista del risultato formale.

\* \* \*

Le quattro tecniche di intervento prima ipotizzate trovano riscontro concreto in tre delle memorie presentate a questo convegno.

La nota inviata dall'Arq. J. O. Lajous illustra, con concrete applicazioni, la tecnica delle iniezioni nelle strutture danneggiate dai sismi con l'obiettivo di far lavorare il sistema strutturale in modo analogo a quello secondo il quale fu progettato; descrive anche un sistema di « pali di controllo » usato per il consolidamento delle fondazioni con la possibilità, mediante opportuni accorgimenti, di variarne la portata e di assorbire cedimenti differenziali del suolo in modo da ripristinare i livelli originari in caso di cedimenti.

Nell'ultima parte della nota viene infine descritta la tecnica di intervento preventivo su edifici alti, prevalentemente torri campanarie, situate in zone sismiche; si tratta della tecnica dei cavi post-tesi che, opportunamente inseriti nella massa muraria, e bloccati superiormente ed inferiormente a telai in cemento armato, conferiscono alla torre notevoli capacità di resistenza a sollecitazioni di flessione, quali quelle derivanti dal sisma. Mi pare di dover segnalare, proprio perché venga approfondita in sede di discussione, una preoccupazione che l'Autore della nota esprime, e cioè « di considerare inadeguato il processo di consolidamento del monumento mediante l'uso di nuove strutture in cemento armato che pretenderebbero di farlo lavorare a trazione; per questo si raccomanda di effettuare soltanto in-

terventi parziali di restauro che non alterino la concezione statica originaria del monumento ».

Ho già richiamato questo problema precedentemente e ritengo che esso debba essere ulteriormente approfondito; me ne dà spunto un'altra delle note presentate al convegno, quella del Prof. A. De Naeyer, che illustra con grande rigore, e con il gusto del cronista, il consolidamento delle grandi colonne della cattedrale di Anversa. Alla chiara descrizione delle fasi dell'intervento sulle colonne danneggiate, intervento effettuato colonna per colonna e pietra per pietra, è premessa l'analisi comparativa dei criteri che hanno orientato la scelta della soluzione, a base di iniezioni di resine effettuate nel nucleo interno delle colonne, realizzato con mattoni, al fine di ottenere una maggiore resistenza ed una minore deformabilità. Questa maggiore resistenza serve a costituire, secondo l'Autore, una riserva contro fattori imprevedibili.

Le conclusioni della nota sono degne di rilievo e meritano di essere sottolineate per il contributo che esse possono fornire alla discussione generale; in particolare va segnalata, come nel caso precedente, la preoccupazione dell'Autore di fronte all'uso indiscriminato di strutture in cemento armato o in acciaio per rinforzare le opere murarie degli antichi monumenti, strutture che generalmente risultano molto più rigide e poco flessibili: « ...vi è la tendenza ad esigere gli stessi margini di sicurezza, come nelle strutture moderne... per il fatto che non si conoscono nè le caratteristiche delle strutture antiche, nè la distribuzione delle sollecitazioni si rinforzano le strutture più di quanto sarebbe necessario giungendo a soluzioni onerose da tutti i punti di vista... ».

La nota presentata da l'Arch. F. Leblanc illustra con chiarezza e semplicità una esperienza di consolidamento di volte in muratura di mattoni mediante iniezioni di resine epossidiche sotto pressione; alle brevi note storiche concernenti la costruzione fa seguito una dettagliata descrizione delle varie fasi della operazione e del procedimento tecnologico impiegato con particolare riferimento all'analisi critica dei valori delle pressioni alle quali l'iniezione deve essere effettuata per ottenere gli effetti migliori; è interessante il resoconto finale nel quale alle quantità di materiali impiegati, di tempi, alla massa muraria consolidata, corrisponde un costo unitario non certo elevato. Queste considerazioni fanno riflettere sul possibile futuro di queste nuove tecniche, non ancora diffuse come meriterebbero, ma certamente competitive dal punto di vista economico.

La nota presentata da J. L. Toupin illustra varie tecniche di intervento per le grandi carpenterie in legno di edifici dell'area francese; vengono così dettagliatamente esaminati tre metodi e cioè smontaggio e ricostruzione, stabilizzazione con strutture complementari, rigenerazioni di parti difettose

mediante resine e fibre di vetro. Alla esposizione dei casi particolarmente significativi in cui queste tre tecniche sono state usate, esposizione sempre critica e comparata, seguono le conclusioni che sono certamente degne di interesse. Forse più che nel caso delle murature l'intervento sulle strutture in legno richiede grande competenza, preparazione professionale da parte di chi progetta l'opera di restauro e soprattutto grande abilità artigianale da parte di chi materialmente esegue il lavoro. In questo senso l'Autore sostiene che le nuove tecniche fondate sull'uso di fibre di vetro e resine possono essere di grande aiuto nel mestiere di carpentiere; va naturalmente fatto salvo il principio che tutte le parti sane della ossatura devono essere reimpiagate.

La nota del Prof. B. H. Feilden e dell'arch. A. Alva ha per oggetto una analisi globale del comportamento dei monumenti nelle zone sismiche, analisi tratta dalle esperienze accumulate dalla ICCROM nei terremoti del Guatemala, del Friuli e del Montenegro. La complessità, la generalità e la difficoltà dei temi trattati non consentono alcun tentativo di riassumere qui il contenuto; mi pare di poter affermare che la grande e riconosciuta esperienza del Prof. Feilden trovi qui una ulteriore conferma.

La nota presentata dagli arch. C. Alessandri, E. Baroni e B. Leggeri dà conto di una serie di esperienze di laboratorio miranti a valutare gli incrementi di resistenza meccanica registrabili nei materiali che di regola compongono il solido murario, e cioè mattoni, malta e conglomerato di malta e laterizio; le prove sperimentali sono state effettuate su provini allo stato naturale e provini impregnati sotto vuoto con resine sintetiche. I risultati fanno prevedere, secondo gli autori, interessanti impieghi strutturali di questa nuova tecnica di trattamento dei materiali non reagenti a trazione.

La nota degli arch. C. Blasi e M. Pecchioli concerne l'analisi sperimentale mediante tecniche fotoelastiche, delle sollecitazioni in strutture murarie elementari, come pilastri, architravi, archi. A differenza delle ricerche condotte da R. Mark qui i modelli sono realizzati con conci sconnessi, a semplice contatto mutuo, e quindi non in grado di trasmettere sforzi di trazione. I risultati ottenuti appaiono di grande pregio; occorre solo, a mio parere, affiancare all'indagine sperimentale valutazioni di carattere teorico che diano piena ragione dei risultati stessi.

L'ultima nota, redatta dall'arch. C. A. Anselmi e dall'ing. L. Fino tratta il problema dell'analisi tensionale nelle murature attraverso l'individuazione di un opportuno modello matematico; i due autori per superare difficoltà computazionali non insormontabili propongono un modello reticolare che non sembra molto somigliante alla muratura cui vorrebbe riferirsi;

sarebbe opportuna una approfondita discussione per valutare con la massima precisione il peso ai fini del risultato numerico, delle ipotesi assunte.

Le note inviate da B. Hoberg, M. Kairamo, J. B. Johnson e J. Stewart concernono argomenti non strettamente connessi ai problemi strutturali; tuttavia le tematiche trattate suscitano interessi tali da meritare una più che approfondita discussione. In particolare devo segnalare il problema sollevato da J. B. Johnson circa la climatizzazione degli edifici monumentali in relazione alla destinazione d'uso; devo anche accennare alle tematiche discusse da J. Stewart per le implicazioni che queste hanno con la variazione della resistenza meccanica che i materiali manifestano in conseguenza del loro trattamento superficiale o di profondità.

\* \* \*

Le note presentate non sono molte; ma tuttavia con i loro contenuti mi pare riescano a coprire quasi tutta la gamma degli interessi settoriali che si possono ravvisare sotto il titolo « strutture ».

Meditando sui loro contenuti si può abbozzare una conclusione ovvia, e cioè che la vastità stessa della materia implica nette divisioni tra chi si occupa di problemi di base, chi lavora sperimentalmente e chi invece opera nel concreto usando tecniche il cui valore sta solo nella razionalità e nell'efficacia del risultato raggiunto, il che poi non è poco, anche se rapportato ad una mancanza di criteri generali scientificamente accertati. Tutto ciò porta a considerare il problema della formazione professionale dei giovani che si avvicinano alle tematiche strutturali del problema del restauro ed a ravvisare la assoluta necessità di collegare la giovane associazione della quale celebriamo la VI assemblea con le altre istituzioni internazionali che ormai da molti anni operano nel campo dell'ingegneria strutturale e della meccanica teorica ed applicata; è questa la raccomandazione che tutti insieme dovremo formulare alla chiusura dei nostri lavori.