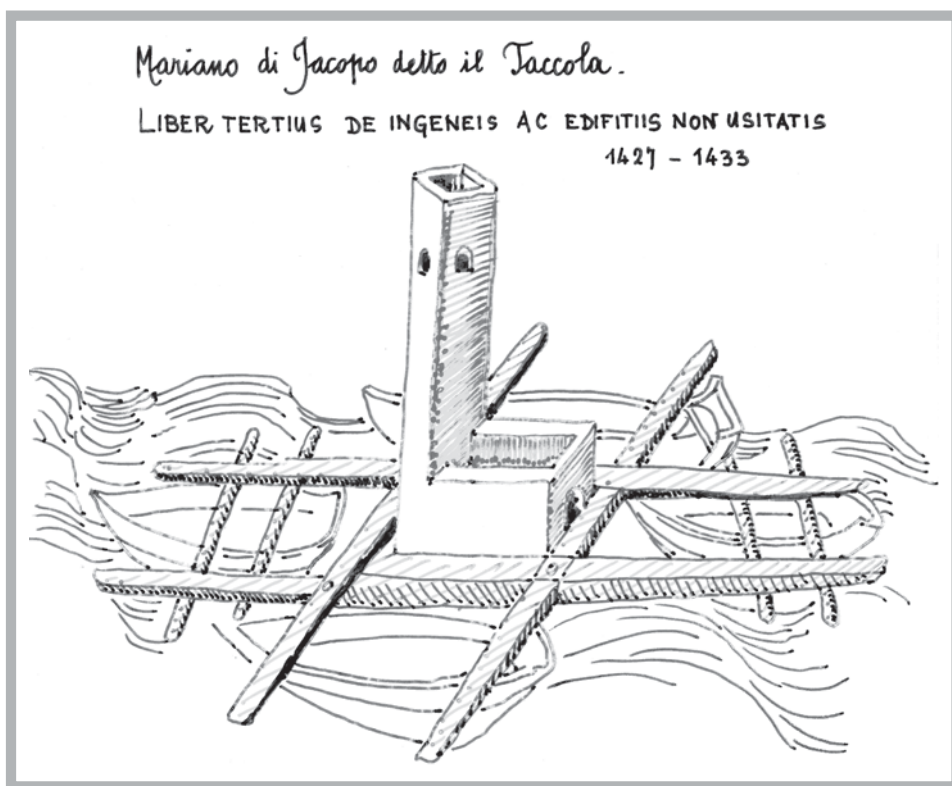


FILIPPO CUCCO

Statica e consolidamento degli edifici storici



CD-ROM ALLEGATO

**GRAFILL**

Filippo Cucco

STATICA E CONSOLIDAMENTO DEGLI EDIFICI STORICI

ISBN 13 978-88-8207-312-1

EAN 9 788882 073121

Manuali, 72

Prima edizione, dicembre 2008

Cucco Filippo <1951->

Statica e consolidamento degli edifici storici / Filippo Cucco.

– Palermo : Grafill, 2008.

(Manuali ; 72)

ISBN 978-88-8207-312-1

1. Strutture edilizie – Statica. 2. Edifici – Consolidamento.

720.288 CDD-21

SBN Pal0212867

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di dicembre 2008

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

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

INDICE

PRESENTAZIONE.....	p.	7
PROLOGO.....	"	9
1. INTRODUZIONE STORICA.....	"	15
1.1. Architettura pre-scientifica.....	"	15
1.2. Architettura post-scientifica.....	"	28
1.3. Evoluzione del concetto di restauro	"	34
2. RICHIAMI DI TEORIA DEI VETTORI	"	41
2.1. Somma grafica	"	43
2.2. Somma analitica	"	44
2.3. Prodotto scalare.....	"	45
2.4. Tipi di vettori.....	"	45
2.5. Somma di cursori	"	46
2.6. Somma di vettori applicati	"	46
2.7. Proprietà dei poligoni funicolari.....	"	47
2.8. Il momento di una forza	"	47
2.9. La coppia	"	49
2.10. Principio di equivalenza e di riducibilità	"	50
3. RICHIAMI DI MECCANICA	"	51
3.1. Condizioni cinematiche e meccaniche di quiete	"	52
3.2. Il Principio dei Lavori Virtuali	"	53
4. STABILITÀ E RESISTENZA	"	57
4.1. Scopo della Scienza delle Costruzioni.....	"	58
4.2. Un modello semplificato della materia.....	"	59
4.3. Leggi costitutive del materiale.....	"	59
4.3.1. <i>Comportamento rigido</i>	"	59
4.3.2. <i>Comportamento elastico</i>	"	59
4.3.3. <i>Comportamento elastico lineare</i>	"	60
4.3.4. <i>Comportamento elastico non lineare</i>	"	60
4.3.5. <i>Comportamento plastico</i>	"	61

4.3.6. Comportamento rigido perfettamente-plastico.....	“	61
4.4. Deformazioni plastiche nel tempo	“	62
4.5. Omogeneità e isotropia.....	“	64
4.6. Stato di tensione nel punto.....	“	65
4.7. Un esempio banale di analisi strutturale.....	“	68
4.8. Cerchio di Mohr	“	73
4.9. Esempio numerico.....	“	74
4.10. Nuove metodologie di analisi strutturale	“	75
4.10.1. Il Metodo degli Elementi Finiti	“	76
4.10.2. Il Metodo degli Elementi di Contorno.....	“	76
4.11. Flusso di tensioni all'interno di un corpo.....	“	77
4.12. La non linearità	“	81
5. LE ROCCE.....	“	83
5.1. Le rocce lapidee.....	“	83
5.2. Le rocce sciolte.....	“	84
5.3. Ciclo delle rocce.....	“	85
5.4. Le pietre da costruzione	“	85
5.5. Caratteristiche meccaniche delle pietre.....	“	87
6. I LATERIZI	“	89
7. I LEGANTI	“	91
7.1. Calce.....	“	91
7.2. Gesso.....	“	93
7.3. Cementi.....	“	94
7.4. Leganti a base di scorie.....	“	95
7.5. Leganti a base di pozzolana.....	“	95
7.6. Le malte	“	96
7.7. Malte aeree.....	“	97
7.8. Malte pozzolaniche	“	97
7.9. Malte cementizie	“	98
7.10. Malte idrauliche	“	98
7.11. Malte bastarde	“	98
7.12. Malte pronte con additivi.....	“	98
7.13. Generalità sul degrado ferro-conglomerato.....	“	99
8. INTRODUZIONE AI SISTEMI COSTRUTTIVI ELEMENTARI.....	“	101
8.1. Stabilità dell'equilibrio.....	“	101
8.2. Attrito.....	“	102
8.2.1. Attrito e superficie	“	103

8.2.2. <i>Il cono d'attrito</i>	”	103
8.3. Coesione.....	”	105
8.4. Vincoli diffusi e vincoli puntiformi.....	”	106
8.5. Vincoli monolateri e bilateri.....	”	106
9. IL MENHIR	”	109
9.1. La tecnica della bilancia.....	”	112
9.2. Verifica di resistenza.....	”	113
9.3. Verifica di resistenza sezione generica.....	”	114
9.4. Verifica di resistenza sezione rettangolare.....	”	116
9.5. Conclusioni.....	”	117
9.6. Applicazione numerica.....	”	118
10. IL DOLMEN (SISTEMA TRILITICO)	”	123
10.1. La mensola di pietra.....	”	123
10.2. La trave appoggiata isostatica.....	”	124
10.3. La trave appoggiata iperstatica.....	”	124
10.4. La trave appoggiata isostatica armata.....	”	126
10.5. Vantaggi dell'iperstaticità.....	”	126
10.6. Meccanismi di collasso per moto rigido.....	”	127
10.7. Il caso Segesta.....	”	128
10.8. Applicazione.....	”	130
10.8.1. <i>Architrave integro</i>	”	131
10.8.2. <i>Architrave fessurato in mezzeria</i>	”	132
10.8.3. <i>Esempio numerico</i>	”	134
10.9. Analisi non lineare con l'uso del MEC.....	”	136
11. GLI ARCHI ISOLATI E LE VOLTE SEMPLICI	”	139
11.1. La simmetria.....	”	140
11.2. L'azione benefica dello sforzo normale.....	”	141
11.3. Tipi di archi e volte.....	”	143
11.4. La curva delle pressioni.....	”	152
11.5. Una lunga storia.....	”	158
11.6. Il procedimento di E. Mèry.....	”	166
11.7. Il calcolo a rottura applicato agli archi isolati ed alle volte.....	”	167
11.8. Verifica di stabilità tramite il Principio dei Lavori Virtuali.....	”	169
11.9. L'analisi elastica non lineare.....	”	169
11.10. L'arco isolato e l'interazione arco muratura.....	”	173
11.11. Strategie per il contenimento della spinta.....	”	175
11.12. Architravi e piattabande.....	”	178
11.13. Le volte.....	”	180
11.14. Le cupole.....	”	188

12. PSEUDO ARCHI E PSEUDO VOLTE.....	p. 195
13. MURATURA.....	" 201
13.1. Muratura lapidea a secco	" 201
13.2. Muratura lapidea a secco con materiale connettore	" 203
13.3. Muratura lapidea a secco lavorata	" 203
13.4. L'importanza dello sfalsamento dei giunti.....	" 207
13.5. Muratura con legante	" 207
13.6. Muratura in laterizio	" 211
13.7. Instabilità elastica per carico di punta	" 214
13.8. Variazione delle caratteristiche fisiche del materiale	" 215
13.9. Le autostrade della sofferenza	" 217
14. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	" 219
14.1. Prova a trazione e compressione	" 221
14.2. Prova a taglio	" 222
14.3. Prova a sforzo normale nei materiali lapidei.....	" 223
14.4. Prove sulle murature.....	" 225
14.4.1. <i>Prova a compressione</i>	" 226
14.4.2. <i>Prova a taglio</i>	" 227
14.4.3. <i>Prove soniche</i>	" 228
14.4.4. <i>Georadar</i>	" 229
14.4.5. <i>Termografia</i>	" 230
14.4.6. <i>Indagini endoscopiche</i>	" 231
15. GEOTECNICA E FONDAZIONI.....	" 233
15.1. Esame indiretto di superficie e metodi geofisici.....	" 233
15.2. Esame diretto	" 235
15.3. Studio delle terre.....	" 236
15.4. Varie forme di presenza della fase liquida	" 239
15.5. Prove sui terreni.....	" 240
15.6. Tensione capillare.....	" 243
15.7. Composizione delle argille e limiti di Atterberg	" 245
15.8. Classificazione granulometrica delle terre.....	" 247
15.9. Permeabilità delle terre.....	" 249
15.10. Angolo di attrito e coesione	" 250
15.11. Stato di tensione	" 253
15.12. Modalità di propagazione delle tensioni	" 253
15.13. Il calcolo della tensione limite.....	" 254
15.14. Tipo di cedimenti	" 254
15.15. Strutture di fondazione.....	" 254

16. LA PRECOMPRESSIONE	p. 261
17. LE PROBLEMATICHE DEL RESTAURO STATICO	" 265
17.1. Finalità dell'analisi strutturale nell'ambito del recupero delle opere murarie	" 269
17.2. Criteri che individuano la validità di un intervento di consolidamento.....	" 270
17.3. Quadro fessurativo	" 273
17.3.1. <i>Lesioni da sforzo assiale di compressione</i>	" 274
17.3.2. <i>Criterio di Coulomb</i>	" 275
17.3.3. <i>Applicazione numerica</i>	" 276
17.3.4. <i>Lesioni per cedimento del piano fondale</i>	" 276
18. TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO	" 281
18.1. Consolidamento del terreno di fondazione	" 281
18.1.1. <i>Consolidamento tramite infissione di pali</i>	" 281
18.1.2. <i>Consolidamento tramite inserimento a forza di terre</i>	" 283
18.1.3. <i>Miglioramento dei terreni tramite iniezioni di materiale cementante</i>	" 284
18.1.4. <i>Congelamento ed elettro-osmosi</i>	" 285
18.1.5. <i>Uso di resine espandenti</i>	" 286
18.2. Consolidamento delle strutture di fondazione.....	" 287
18.2.1. <i>Ampliamento della base fondale</i>	" 288
18.2.1.1. <i>Esempio numerico</i>	" 291
18.2.3. <i>Sottomurazioni</i>	" 292
18.2.4. <i>Fondazioni su pali</i>	" 294
18.3. Consolidamento strutture in elevazione	" 297
18.3.1. <i>La cerchiatura</i>	" 298
18.3.2. <i>Diatoni</i>	" 301
18.3.3. <i>I tiranti</i>	" 302
18.3.3.1. <i>Applicazione numerica</i>	" 304
18.3.4. <i>Iniezioni</i>	" 305
18.3.4.1. <i>Fasi di esecuzione</i>	" 307
18.3.5. <i>La sostituzione muraria</i>	" 310
18.3.6. <i>Le perforazioni armate</i>	" 312
18.3.7. <i>Intonaci armati</i>	" 313
18.4. Nastri in FRP, ovvero riparare con lo scotch®	" 316
18.4.1. <i>Il Béton-Plaqué</i>	" 316
18.4.2. <i>I materiali compositi</i>	" 317
18.4.2.1. <i>Messa in opera</i>	" 319
18.5. Consolidamento di archi e volte.....	" 322
18.5.1. <i>Rinfianchi</i>	" 322
18.5.2. <i>Frenelli</i>	" 323
18.5.3. <i>Cappe armate</i>	" 325
18.5.4. <i>Perforazioni armate</i>	" 326

18.5.5. Rinforzo con fibre naturali	p.	327
18.5.6. Catene.....	"	328
18.5.7. Nastri in CFRP	"	330
18.6. Consolidamento di cupole	"	333
19. AZIONI DINAMICHE	"	339
19.1. Il Terremoto	"	339
19.1.1. Aspetti normativi.....	"	342
19.1.2. Effetto delle azioni sismiche su una parete muraria	"	343
19.2. Le vibrazioni	"	347
20. LA DIRETTIVA DEL P.C.M. PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO	"	349
21. ESEMPI APPLICATIVI.....	"	355
21.1. Verifica approssimata	"	355
21.2. Verifica con le dimensioni effettive	"	357
21.3. Verifica di resistenza a flessione	"	357
21.4. Consolidamento di un cornicione	"	359
21.4.1. Consolidamento mediante perforazioni armate.....	"	359
21.4.2. Consolidamento mediante barre pretese	"	360
21.4.3. Consolidamento mediante nastri in CFRP	"	364
21.4.4. Consolidamento tramite grappe	"	365
21.4.4.1. Determinazione dello sforzo nella grappa in presenza del solo peso proprio e della presollecitazione indotta dal salto termico impresso di -5°.....	"	367
21.4.5. Considerazioni conclusive	"	368
GUIDA ALL'INSTALLAZIONE DEL CD-ROM ALLEGATO	"	369
Contenuti del CD-ROM allegato.....	"	369
Requisiti di sistema per l'installazione.....	"	369
Procedura per la richiesta della "password utente"	"	370
Procedura per l'installazione del software	"	370
BIBLIOGRAFIA	"	373
LICENZA D'USO	"	375
SCHEDA PER LA REGISTRAZIONE DEL SOFTWARE.....	"	376

PRESENTAZIONE

Il principale obiettivo di un libro di statica e consolidamento delle costruzioni murarie è quello di fornire al lettore un'adeguata conoscenza dei fenomeni fisici che caratterizzano il loro comportamento, ma anche quello di suggerire metodologie utili per un'analisi strutturale e tecniche di intervento appropriate nel rispetto della tecnologia e dei materiali.

Il testo affronta questo tema con sapienza e competenza, riuscendo bene a coniugare il rigore scientifico agli aspetti di pratica corrente nell'affrontare patologie strutturali anche di difficile interpretazione. Il lettore è sospinto ad osservare i fenomeni utilizzando le proprie conoscenze, accomunando la cultura scientifica e quella classica in un'unica visione del problema da studiare. Si fanno osservare particolari aspetti della meccanica e della cinematica delle murature ricorrendo spesso a semplici esempi che rendono comprensibili le problematiche e danno suggerimenti per una loro facile soluzione.

Infine, per mostrare l'efficacia delle ipotesi, si ricorre spesso all'uso del programma di calcolo Karnak.sGbem, adatto per sua natura ad affrontare vari sistemi piani strutturali, ma che risulta particolarmente adatto allo studio delle murature. Questo programma mi ha visto, assieme all'arch. Filippo Cucco e l'arch. Silvio Terravecchia, impegnato nell'utilizzare un nuovo approccio per lo studio strutturale dei mezzi continui, basato sul Metodo simmetrico degli Elementi di Contorno. Questo testo è rivolto a studenti di ingegneria e di architettura, ma anche a professionisti ed operatori del settore.

Teotista Panzeca

*Prof. di Scienza delle Costruzioni – Università di Palermo – Facoltà di Architettura
Presidente del CdL di Architettura dell'Università KORE di Enna*

PROLOGO

L'Italia è uno dei paesi in cui la storia ha lasciato tra le massime vestigia architettoniche: basta scorrere l'elenco dei siti definiti dall'UNESCO *patrimonio dell'umanità* per rendersi conto che l'elenco più nutrito è proprio quello che riguarda il nostro paese. L'immensa dotazione di opere pittoriche, scultoree, architettoniche e di siti archeologici fa di noi gli eredi più ricchi ma anche i più ricolmi di responsabilità. Cotanto patrimonio va conservato e protetto in modo adeguato e ciò non è certamente un onere da poco sia in termini economici che in termini culturali.

La Tabella 1 mostra l'andamento degli introiti, espressi in milioni di euro, dal 1996 al 2005 avuti da musei, monumenti ed aree archeologiche statali.

Come si vede il *trend* è senz'altro positivo e queste cifre, se adeguatamente reinvestite, potrebbero costituire una base importante per il mantenimento e la promozione del patrimonio artistico-monumentale.

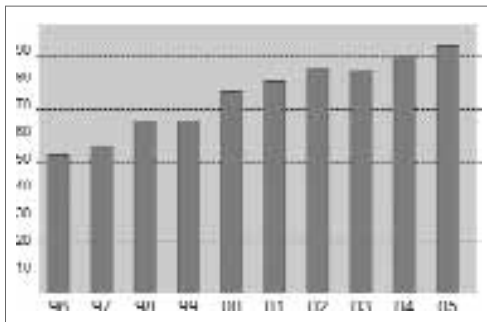


Tabella 1. Introiti, in milioni di euro, avuti da musei, monumenti ed aree archeologiche statali. Si nota una crescita progressiva ma lenta (Fonte: Ministero per i Beni e le Attività Culturali).

In un contesto in cui le opere del passato hanno una notevole valenza, dovrebbe esistere una sorta di *genius loci* in grado di ispirare una diffusa cultura del restauro e della conservazione tale da produrre figure professionali consapevoli e di alto profilo.

Nella Carta del Restauro Italiana del 1931 si legge: *“Il Restauro in Italia si eleva al grado di una grande questione nazionale, e va evidenziata la necessità di mantenere e di perfezionare sempre più il primato incontestabile che in tale attività, fatta di scienza di arte e di tecnica, il nostro paese detiene.”*

Certo retorica da ventennio; in realtà il *primato* di cui sopra – se è mai esistito – in pratica, anziché perfezionarsi, si è sciolto come neve al sole. Il luogo in cui istituzionalmente si formano le basi culturali di una società è la scuola; in Italia essa è stata mortificata e ridotta a brandelli e la sua funzione è divenuta più quella di serbatoio di redditi certi per gli insegnanti che quella di guida alla comprensione del mondo che ci circonda. La scuola dell'obbligo viene intesa come avente solo la funzione di assegnare a tutti, loro malgrado, un titolo di studio. Se è possibile e doveroso insegnare a tutti delle tecniche di base come il leggere e lo scrivere o il far di conto, non è però possibile imporre l'interesse per lo studio e la ricerca a colpi di Decreti e Circolari. Il motto *Tutti avanti!* ha sì migliorato le statistiche sul numero di diplomati e laureati ma ha fatto precipitare a capofitto la qualità. Contrariamente alle ideologie che hanno devastato più di un secolo di storia, si dovrebbe avere il coraggio di affermare con Goethe¹ che *quanto più giro il mondo tanto meno nutro la*

¹ J.W. Goethe, *Viaggio in Italia*.

speranza che l'umanità possa mai diventare tutta intelligente, saggia e felice.

Questo discorso sulla scuola sarebbe pleonastico se non per osservare, con rammarico, che ad es. nelle Facoltà di Architettura l'area del restauro, con particolare riguardo al restauro strutturale, è stata sempre mortificata e di secondaria importanza; da ciò consegue che gli architetti, ai quali per legge è riconosciuta l'esclusiva competenza sugli edifici di interesse monumentale, mostrano una sudditanza psicologica e culturale nei confronti degli ingegneri ai quali, in deroga, è possibile intervenire in questioni di ordine tecnico. Gli Organi demandati a vigilare sui beni monumentali – terreno incontrastato di archeologi e architetti – spesso sono dei covi di burocrati che, anche per i motivi anzidetti, tendenzialmente non manifestano delle professionalità all'altezza dello scopo.

Non di rado le Soprintendenze *filtrano un moscerino ed ingoiano un cammello* dispensando prescrizioni risibili ed avallando progetti di consolidamento strutturale totalmente inadeguati e che si sono rivelati nel tempo dei veri disastri.

Essi paradossalmente hanno arrecato a quegli stessi monumenti che si proponevano di salvaguardare dei danni irreparabili.

Prima della rivoluzione industriale la moderna dicotomia struttura-forma era quasi inesistente essendo l'una l'alter ego dell'altra; la separazione delle carriere di architetto e di ingegnere ha creato due figure dotate di diversa sensibilità e competenza. Si è creata una forbice tra l'aspetto storico critico-compositivo e quello tecnico-scientifico. Gli architetti maggiormente orientati al primo, gli ingegneri al secondo. Da tempo di fatto è venuta fuori una nuova dicotomia, priva di qualunque fondamento, tra *restauro* e *consolidamento strutturale*: l'uno incanalato all'interno di regole comportamentali tratte dalle varie Carte messe a punto nel corso del tempo – quasi sempre, a dire il vero, disattese –; l'altro, invece, spesso basato su

personali *regole ingegneristiche* e di frequente dominato dall'uso acritico dei nuovi materiali imposti dal mercato.

Agli architetti il crogiolarsi tra polemiche relative al restauro filologico, critico o conservativo; tra teoria del riuso e cristallizzazione museografica, in molti casi facenti uso di un lessico ambiguo che crea non poche incomprensioni tra le varie scuole di pensiero; agli ingegneri il compito di approntare provvedimenti per *far stare in piedi* il tutto, spesso trascurando le interazioni materia-tempo ed i relativi effetti collaterali.

Tuttavia una tenue luce sembra rischiarare l'orizzonte: all'interno delle facoltà di Architettura, con l'attivazione di nuove discipline specialistiche dedicate allo studio della statica e del consolidamento delle strutture murarie, si tenta di fornire agli studenti uno strumento che dovrebbe permettere loro, sia in futura veste di progettisti che di tecnici demandati al controllo, di orientarsi meglio all'interno del bailamme delle tecniche di consolidamento e dell'offerta di nuovi materiali *miracolosi* che spesso di straordinario hanno solo i costi di utilizzo.

Questo libro è il frutto di 7 anni di insegnamento – come docente a contratto presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Palermo – di materie quali *Statica e stabilità delle costruzioni murarie e monumentali* e *Consolidamento degli edifici storici*.

Ci si è sforzati di riportare il *consolidamento degli edifici storici* all'interno della Teoria del Restauro e, nell'intento di dare alla materia dignità scientifica e completezza, di distillare da varie discipline, Tecnologia dell'Architettura, Storia dell'Architettura, Statica, Scienza delle Costruzioni, Geotecnica etc. tutti quei concetti che contribuiscono a formare la spina dorsale della materia.

La disciplina le cui metodologie sono più prossime a quelle del restauro strutturale è la *medicina*, da essa deriverà tutta la nostra terminologia tecnica: anatomia, fisiologia, anamnesi, eziologia, patologia, diagnosi, cura, prognosi;

tutti termini che verranno definiti nel corso della trattazione. All'interno di una calzante metafora, il posto del malato è preso dal *monumento* e quello del medico dal *restauratore* (nell'accezione più ampia che comprende anche chi si occupa espressamente del consolidamento statico del manufatto). In campo medico sono ben note certe figure professionali quali gli *informatori scientifici*, i quali hanno, appunto, la funzione di informare il medico dell'esistenza di nuovi prodotti farmaceutici che dovrebbero aiutarlo nella formulazione della cura più appropriata al tipo di patologia riscontrata. Nella nostra metafora il posto degli informatori è preso dai *promoter* delle ditte specializzate che propongono nuovi materiali e nuove tecniche d'intervento, presentati spesso come una *panacea* per tutti i mali. Così come certi medici, a volte, si affidano acriticamente ai prodotti della farmacopea senza vagliarne direttamente la reale efficacia e soprattutto gli *effetti collaterali*, altrettanto accade ai tecnici del restauro i quali si affidano ai prodotti di mercato senza approfondirne adeguatamente ad es. le caratteristiche di compatibilità e durabilità.

Il testo, dopo una breve nota introduttiva sull'evoluzione storica dei sistemi costruttivi, passerà allo studio delle caratteristiche fisico-mecchaniche dei materiali costituenti il *sistema* muratura, inteso o come elemento risultante dall'assemblaggio a secco di materiali quali pietre e/o laterizi o come aggregazione di inerti e legante. Successivamente verranno richiamati, nella forma più discorsiva possibile, quei concetti di *matematica* e *scienza delle costruzioni* che si ritengono propedeutici ad una migliore comprensione dei fenomeni; quindi si procederà allo studio dei sistemi costruttivi elementari (menhir, dolmen, archi, volte, pareti murarie) e ad impostare un approccio metodologico, mutuato dalla medicina, basato sulle tre fasi classiche di *anamnesi*, *diagnosi* e *cura* (non senza aver dato una scorsa preventiva alla *anatomia*, *fisiologia* e *patologia*) e sulla

definizione di quei *parametri fondamentali* che devono sempre informare un qualunque progetto di restauro strutturale. L'ultima parte tratterà dei vari interventi di consolidamento letti attraverso la lente dei parametri critici definiti nella fase precedente e sviscerati con sofisticate tecniche di analisi strutturale quali il Metodo degli Elementi di Contorno (MEC).

Compito del restauro strutturale non è quello di costruire edifici ex novo ma di intervenire, forti delle attuali conquiste della scienza e della tecnica, su manufatti esistenti realizzati e concepiti secondo le cognizioni costruttive del tempo, pertanto si attingerà a piene mani nella trattatistica classica e sette-ottocentesca riportando ampi stralci di queste opere per cercare di capire i criteri tecnici allo stato dell'arte in base ai quali le opere edilizie avrebbero dovuto essere pensate e costruite.

L'estrema difficoltà di approntare modelli di calcolo che possano aiutare il tecnico e gli organi di controllo nella scelta degli interventi più efficaci ha fatto scorrere il tempo a ritroso. Non è difficile trovare, nella sedicente letteratura di settore, pratiche del tipo di quelle della *medicina alternativa*, si danno consigli e si spiegano tecniche d'intervento in modo apodittico, senza dare i necessari strumenti di verifica e controllo numerico. Il Metodo degli Elementi Finiti, implementato in tutti i software di analisi strutturale in commercio, non è in condizione di fornire un modello, nel contempo semplice ed adeguato, capace di eseguire l'analisi di strutture murarie in cui siano inserite perforazioni armate, tiranti precompressi, nastri di CFRP ed altri materiali compositi. La mancanza di queste tecniche di controllo ha fatto proliferare interventi che sono più a detrimento che a salvaguardia dei monumenti in cui sono applicate. Non sarà difficile nel tempo vedere monumenti sfigurati e mortificati nella loro più intima concezione strutturale.

Per lo studio e la comprensione dello stato di sofferenza interna di una struttura – stato di tensione e di deformazione – si è fatto uso di

un supporto informatico basato sul MEC (*Metodo degli Elementi di Contorno*): *Karnak.sGbem* di *Bemsoft s.r.l.*

Nella realizzazione di questo software rivoluzionario un notevole sforzo è stato profuso anche nel semplificare la gestione e l'interpretazione dei dati in uscita. La risposta della struttura viene sempre trasformata in immagini dotate di una forza di sintesi straordinaria.

La psiche umana è inadatta ad una qualunque forma di sintesi numerica, essa si trova a suo agio soltanto in un mondo ricco di metafore iconografiche – importanti sono stati gli studi del MIT che hanno dato il via alle famose interfacce grafiche dei sistemi operativi Macintosh™ prima e Windows™ a seguire –. Gli uomini hanno una naturale idiosincrasia nei confronti di sterili ed interminabili liste di numeri, si ha sempre la tendenza a trasformarle in grafici, isto-

grammi, immagini analogiche. *Karnak.sGbem* asseconda questa naturale inclinazione ricorrendo sempre ad una rappresentazione grafica e cromatica dei risultati dell'analisi numerica: così lo stato di tensione interno si trasforma in mappe colorate giustapposte allo schema geometrico della struttura, dove ad ogni sfumatura di colore corrisponde un diverso stato di sofferenza. A colpo d'occhio si individuano subito le parti più cimentate e maggiormente suscettibili a rotture localizzate. Viene reso possibile osservare il mutamento del flusso tensionale in prossimità di fessure, aperture ed intarsi composti da materiali diversi.

Attraverso delle animazioni viene mostrato il modo di deformarsi del sistema, ciò spesso aiuta a capire in profondità anche il comportamento di sistemi dalla geometria complessa e variegata.