

Giovanni Menditto

# FESSURAZIONI NELLE STRUTTURE

Rilievo, lettura, diagnosi:  
una visione degli eventi degradanti  
alla luce delle nuove NTC



Dario Flaccovio Editore

Giovanni Menditto

FESSURAZIONI NELLE STRUTTURE

ISBN 978-88-579-0059-9

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 - fax 091525738  
[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: ottobre 2010

Menditto, Giovanni <1931>

Fessurazioni nelle strutture : rilievo, lettura, diagnosi: una visione degli eventi

Degradanti alla luce delle nuove NTC / Giovanni Menditto.

- Palermo : D. Flaccovio, 2010.

ISBN 978-88-579-0059-9

1. Strutture in legno – Lesioni. 2. Strutture in cemento armato – Lesioni.

624.17 CDD-22

SBN Pal0229512

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

Impaginazione: Copy Emme di Berti Marzia sotto la direzione dell'Autore

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, ottobre 2010

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

#### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o al programma allegato
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: [www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0059](http://www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0059)

## INDICE

### *Presentazione*

1. INTRODUZIONE	
1.1. Nozione di dissesto	pag. 1
1.2. Manifestazioni fessurative e loro tipologia	» 6
1.3. Semiotica dei dissesti	» 12
1.4. Quadri fessurativi	» 13
1.5. Lettura dei quadri fessurativi	» 17
1.6. Gerarchie per il monitoraggio	» 25
1.6.1. Monitoraggio a distanza	» 26
1.6.2. Metodologie di monitoraggio	» 28
1.6.3. Apparecchiature di monitoraggio	» 29
1.6.4. Software di acquisizione	» 30
1.6.5. Software di elaborazione	» 30
1.7. Premessa all'analisi dei dissesti	» 32
2. DISSESTI NELLE OPERE MURARIE	
2.1. Brevi richiami di terminologia e morfologia delle murature	» 35
2.2. Cause e tipologie dei dissesti	» 54
2.2.1. Principali cause perturbatrici	» 54
2.2.2. Comportamento locale di pannellature murarie ai differenti stati tensionali	» 68
2.2.3. Tipologia dei dissesti	» 76
2.2.4. Cause chimiche di degrado	» 77
2.2.5. Lesioni da rassetto	» 78
2.2.6. Lesioni di contrazione	» 79
2.2.7. Lesioni da cedimenti	» 80
2.2.7.1. Cedimenti – Definizioni	» 80
2.2.7.2. Cedimenti fondali	» 91
2.2.7.3. Traslazione verticale	» 118
2.2.7.4. Effetto arco	» 124
2.2.8. Traslazione orizzontale	» 126
2.2.9. Rotazione	» 126
2.2.9.1. Cedimento di rotazione	» 133
2.2.9.1.1. Introduzione	» 133
2.2.9.2. Gli effetti	» 137
2.2.10. Schiacciamento degli elementi compressi	» 139
2.2.11. Fessure conseguenti all'effetto della trazione	» 151
2.2.12. Ulteriori tipologie di manifestazioni fessurative	» 151
2.2.12.1. Forze normali al piano del muro	» 151
2.2.12.2. Zone intermedie di muri pieni	» 154
2.2.12.3. Interazioni murarie	» 155
2.2.12.4. Disposizione asimmetrica delle forature	» 158
2.2.12.5. Cedimento di architravi	» 158

2.2.13. Fessurazioni dovute all'effetto dirompente della vegetazione spontanea	»	162
2.2.14. Lesioni conseguenti agli effetti del ritiro e/o delle escursioni termiche	»	166
2.2.15. Effetti della mancata presenza di giunti di controllo	»	168
2.2.16. Effetti delle deformazioni di elementi adiacenti	»	170
2.2.17. Meccanismi di distacco degli strati di intonaco dal supporto murario	»	172
2.2.18. Effetto dell'attrito negativo sui pali di fondazione	»	172
2.2.19. La pressoflessione e la stabilità dell'equilibrio elastico	»	173
2.2.19.1. La pressoflessione	»	173
2.2.19.2. La stabilità dell'equilibrio elastico	»	174
<b>3. DISSESTI NEI SOLAI</b>		
3.1. Introduzione	»	181
3.2. Brevi richiami di terminologia e morfologia dei solai in legno	»	182
3.3. Manifestazioni di degrado nei solai lignei	»	188
3.4. Brevi richiami di tecnologia e morfologia dei solai in ferro	»	191
3.5. Manifestazioni di degrado dei solai in ferro	»	200
3.6. Cenni di tecnologia e morfologia dei solai in latero-cemento armato	»	202
3.7. Dissesti nei solai in latero-cemento armato	»	204
<b>4. DISSESTI DELLE SCALE</b>		
4.1. Generalità	»	225
4.2. Lesioni nelle rampe in muratura (o volte veloidiche)	»	225
4.2.1. Scale a sbalzo	»	225
4.2.2. Volte a volo	»	227
4.3. Lesioni nelle scale in conglomerato cementizio armato	»	229
<b>5. STRUTTURE VOLTATE</b>		
5.1. Brevi richiami di terminologia e morfologia delle strutture voltate	»	231
5.1.1. Introduzione	»	231
5.1.2. Gli archi	»	231
5.1.3. Le volte	»	238
5.1.3.1. Volte a botte	»	241
5.1.3.2. Volte a vela	»	244
5.1.3.3. Muri di controspinta	»	250
5.1.4. Le cupole	»	253
5.2. Dissesti nelle strutture voltate	»	254
5.3. Stabilità degli archi	»	255
5.4. I dissesti degli archi	»	258
5.5. I dissesti nelle volte	»	262
5.6. Rotazioni dei sostegni murari	»	273
5.6.1. Distacchi delle strutture interne dal muro di facciata	»	275
5.6.2. Deformazione dei vani delle aperture	»	276
5.6.3. Abbassamento delle volte	»	276
5.7. I dissesti nelle cupole	»	278
<b>6. DISSESTI DELLE TORRI, CAMPANILI E DI ALTRE STRUTTURE A PREVALENTE SVILUPPO VERTICALE</b>		
6.1. Torri	»	281

6.1.1. Torri a pianta poligonale ed a struttura monolitica	» 281
6.1.2. Torri a pianta poligonale ed a struttura ordinaria	» 281
6.1.3. Torre a pianta circolare ed a struttura monolitica ed ordinaria	» 282
6.2. Campanili	» 282
7. EFFETTI DELL’AZIONE SISMICA SULLE STRUTTURE MURARIE	
7.1. Introduzione	» 287
7.2. Meccanismi del danno sismico	» 290
7.2.1. Dissesti localizzati	» 291
7.2.2. Dissesti di insieme	» 295
7.3. Strutture murarie - archi	» 300
8. DISSESTI NELLE STRUTTURE PREFABBRICATE	
8.1. Introduzione	» 303
8.2. Manifestazioni fessurative ricorrenti	» 306
9. STRUTTURE IN CONGLOMERATO CEMENTIZIO ARMATO	
9.1. Introduzione	» 321
9.2. Quadri fessurativi nelle opere in conglomerato cementizio con armatura lenta	» 322
9.2.1. Fessure di carattere tecnologico	» 324
9.2.1.1. Fessure da ritiro plastico	» 324
9.2.1.2. Fessure di assestamento	» 325
9.2.1.3. Fessure da ritiro igrometrico (o di essiccamento)	» 326
9.2.1.4. Fessure da espansione termica	» 227
9.2.1.5. Fessure da ritiro termico	» 227
9.2.1.6. Degradazione dei materiali	» 332
9.2.1.6.1. Effetti di fenomeni chimici	» 332
9.2.1.6.2. Decalcificazione	» 336
9.2.1.6.3. Corrosione dell’acciaio	» 337
9.2.2. Fessure di carattere meccanico	» 343
9.2.2.1. Distribuzione delle lesioni in una trave	» 343
9.2.2.2. Distribuzione delle lesioni in un pilastro	» 353
9.2.2.3. Lesioni nelle tamponature	» 357
9.2.2.4. Lesioni tipiche dell’ancoraggio e della presenza di carichi concentrati	» 366
9.3. Quadri fessurativi nelle strutture intelaiate	» 368
9.4. Dissesti per variazione dell’originario schema naturale strutturale	» 376
9.5. Dissesti degli elementi aggettanti	» 378
9.6. Dissesti su supporti appoggiati	» 379
9.7. Dissesti per fatica	» 380
9.8. Quadri fessurativi nelle strutture bidimensionali piane o curve e nei contenitori	» 381
10. MANIFESTAZIONI FESSURATIVE NELLE PAVIMENTAZIONI	
10.1. Brevi richiami tipologici sulle pavimentazioni industriali in calcestruzzo	» 389
10.2. I giunti	» 394
10.3. Deterioramento e manifestazioni fessurative nelle pavimentazioni	» 401
10.3.1. Generalità	» 401

10.3.2. Quadri fessurativi	» 402
<b>11. DISSESTI NELLE STRUTTURE IN CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER EFFETTO DELLO SCUOTIMENTO SISMICO</b>	
11.1. Introduzione	» 415
11.2. Dissesti negli elementi in conglomerato cementizio armato	» 416
11.3. Dissesti nelle strutture intelaiate in conglomerato cementizio con armatura lenta	» 427
11.3.1. Generalità	» 427
11.3.2. Telai monopiano	» 431
11.3.3. Telai pluripiani	» 436
11.4. I piani soffici ( <i>soft-stories</i> )	» 438
11.5. Effetti delle tamponature ad altezza limitata, delle scale, dei piani sfalzati	» 439
11.6. Inadeguamento dei giunti	» 443
11.7. Pannelli	» 443
11.8. Solai	» 446
11.9. Solette	» 447
11.10. Il caso degli edifici adiacenti	» 448
11.11. Scala macrosismica EMS – 98 – European Macroseismic scale 1998	» 448
<b>12. MANIFESTAZIONI FESSURATIVE NELLE STRUTTURE LIGNEE</b>	
12.1. Introduzione	» 451
12.2. Biodegradamento	» 463
12.2.1. Generalità	» 463
12.2.2. Insetti	» 463
12.2.3. Funghi	» 467
12.3. Dissesti in impalcati lignei	» 472
12.4. Ispezioni visuali	» 475
12.5. Valutazioni dei difetti originari	» 475
12.6. Valutazioni degli attacchi e dei degradi	» 476
12.7. Metodi strumentali	» 477
12.7.1. Tecniche diagnostiche	» 477
12.7.1.1. In situ	» 477
12.7.1.2. Indagini di laboratorio	» 483
12.8. Indagine dendrocronologica	» 487
12.9. Carte tematiche	» 487
12.10. Indagine strutturale	» 488
<b>13. DISSESTI DELLE STRUTTURE METALLICHE</b>	
13.1. Aspetti generali	» 493
13.2. Esempi di dissesti	» 507
13.2.1. Crollo di una copertura	» 507
13.2.2. Crollo di una centina Melan	» 507
13.2.3. Crollo di un arco reticolare	» 508
13.3. Controlli	» 510
<b>14. OPERE DI PRESIDIO PROVVISORIO</b>	
14.1. Introduzione	» 513

14.2. Opere di presidio provvisorio	»	513
14.2.1. Puntellatura	»	513
14.3. Tipologia delle puntellature	»	525
14.3.1. Puntellatura per strutture murarie interessate da lesioni per schiacciamento	»	525
14.3.2. Puntellatura di strutture che abbiano ruotato	»	529
14.4. Dimensionamento dei puntelli	»	532
14.4.1. Gli schemi di calcolo	»	532
14.4.2. Esempi	»	536
14.5. Opere di presidio nel caso di cedimenti di notevole entità	»	542
14.6. Puntellamento di strutture arcuate	»	545
14.7. Forma e dimensioni dei materiali più comunemente impiegati nelle puntellature	»	550
14.7.1. Legno	»	550
14.7.2. Acciaio	»	552
APPENDICE I – LA SCALA MICROSISMICA EUROPEA EMS – 98	»	555
PRINCIPALI FONTI	»	561

## **PRESENTAZIONE**

Il risalire alle cause che hanno innescato manifestazioni di degrado nelle opere di ingegneria civile, per i numerosi parametri in gioco e le loro non sempre chiare interrelazioni, rimane un problema di non agevole soluzione.

Dell'argomento, sia pure in forma separata per le varie tipologie, si sono occupati diversi autori (richiamati in bibliografia), tra i quali è doveroso segnare il dott. ing. Sisto Mastrodicasa per i suoi pregevoli apporti ed al cui insegnamento è qui, in particolare, orientato il capitolo sulle murature.

Lo scopo di questo testo è di raccogliere in modo organico, con aggiunte di contributi personali, gli aspetti più rilevanti del problema con l'intento di fornire un modesto ausilio unitario a quanti si accingono ad affrontare questa tematica.

È apparso utile richiamare le morfologie e tipologie dei vari organismi strutturali sia perché, pur essendo la costruzione di molti di essi da tempo obsoleta, sono tutt'ora presenti nel tessuto urbano, sia perché le loro modalità costruttive forniscono interessanti "leges artis".

La vastità della materia ha richiesto la consultazione, oltre che dei testi e riviste d'epoca, specie per il capitolo sulle murature (Russo Cristoforo) e sulle superfici voltate (Guido Guerra), anche di studi recenti (Albert Defez, Adriano Pasta, Fritz Leonard, Fiengo Giuseppe ed altri) dai quali sono state riprese alcune figure, ormai dominio della letteratura di settore, tutte ridisegnate, citando fonte ed autore.

L'autore ringrazia l'ing. Giuseppe D'Aria per la collaborazione fornita nella revisione delle bozze.

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1. Nozione di dissesto

Le condizioni di sicurezza o di *efficienza strutturale*<sup>1</sup> di un manufatto possono essere ridotte o addirittura vanificate da manifestazioni esterne di una crisi (*dissesto*) che investe il complesso o qualche sua parte e che può trarre origine da:

- alterazione delle condizioni del piano fondale (a seguito ad es. di infiltrazioni di acqua, presenza di cavità, etc.) e/o della sua insufficienza portante;
- incremento delle azioni per variazione di destinazione (p. es. sopraelevazioni);
- alterazione dell'originario schema strutturale (p. es. creazione di nuove aperture, soppressione di alcuni elementi portanti, etc.), sostituzione di elementi spingenti (archi, volte, etc.) con elementi lineari (solai, travi, etc.), spostamenti dei vani scala, sostituzioni di pareti continue con pilastri nei piani bassi, etc.;
- anomalie costruttive;
- errati interventi di consolidamento o di ripristino funzionale tramite l'introduzione o l'accostamento di nuove tipologie incompatibili con le preesistenti;
- azione di degrado operata dal tempo o dagli agenti atmosferici, vegetali e biologici sui materiali lapidei e le malte<sup>2</sup>;

---

<sup>1</sup> Un manufatto per la sua *efficienza strutturale* dovrebbe possedere le seguenti qualità:

- **resistenza**: capacità di un sistema di non rompersi quando è soggetto a delle azioni;
- **stabilità**: capacità di un sistema di subire perturbazioni senza allontanarsi indefinitivamente dalla sua configurazione di equilibrio;
- **duttilità**: capacità di un corpo di subire deformazioni permanenti senza rompersi e senza perdere resistenza in modo apprezzabile;
- **ridondanza**: qualità di una struttura di riuscire a sostenere i carichi in più di un modo, cioè di riportare a terra le azioni tramite più *percorsi di carico*.

<sup>2</sup> Si veda anche la:

**UNI 9124-2** – *Edilizia residenziale – Strutture di elevazione di muratura (ed elementi costruttivi associati). Classificazione dei degradi e degli interventi.*

Le zone soggette in modo massiccio all'azione degli agenti aggressivi sono quelle:

- concomitanti ai *giunti di dilatazione* con ammaloramenti di testate di travi, di appoggi, pulvini, bordi delle pile, appoggi fissi, etc.;
- al di sotto delle pavimentazioni;

- cause naturali ad azioni occasionali (terremoti, incendi, scoppi, alluvioni, etc.);
- cause per sollecitazioni oblique con insufficienti o mancanti membrature necessarie a fronteggiarle;

In particolare si può avere degradazione:

- *del materiale per effetti endogeni*: alterazione naturale del materiale (invecchiamento delle malte povere con progressiva diminuzione della loro capacità legante). Il fenomeno può essere aggravato, specie per le strutture murarie, da effetti di degrado *esogeni*: alterazione a causa di agenti esterni come p. es. vibrazioni indotte dal traffico pesante (*ultra* § 2.2.1);
- *per sensibili variazioni termiche ed igrometriche*: ad es. l'effetto del gelo sulle murature porose;
- *per opera dell'umidità*;
- *per la presenza del vapore acqueo nell'atmosfera* che può condensare in una muratura sulla sua superficie o all'interno della muratura stessa;
- *per la presenza di acqua nel terreno* che può infiltrarsi nelle murature interrato o essere catturata nei muri per risalita capillare<sup>3</sup>;
- *per la presenza di acqua nei materiali impiegati* per la costruzione dei muri;
- *per effetto della pioggia (acque acide<sup>4</sup>)* che, sotto la spinta del vento, può penetrare all'interno delle pareti dell'edificio;
- *per effetto di un cattivo sistema di smaltimento delle acque piovane*;

- 
- nelle solette e nelle travi, specie se in conglomerato cementizio presollecitato (c.a.p.) a cavi scorrevoli con cavi rialzati e bloccati in soletta;
  - in corrispondenza dei pluviali di scarico delle acque.

Per quanto attiene la *vetustà* dell'opus, i suoi effetti vanno considerati sia in rapporto all'*età* del manufatto sia in riferimento alla sua *manutenzione* ed alle sue *caratteristiche costruttive*. Incidono anche, sia pure in misura limitata, le condizioni di uso dell'opera e l'ubicazione. Così, ad esempio, un edificio a carattere industriale ed in presenza di fattori nocivi esterni (acqua, vibrazioni, etc.) sarà soggetto ad un deperimento tipico più accentuato.

<sup>3</sup> La *risalita capillare* è dovuta alle *forze di adesione* che in un vaso di dimensioni ridotte (capillare) si attivano tra il liquido in esso contenuto e le pareti del vaso stesso. L'altezza massima di risalita capillare dipende dalle dimensioni dei pori del materiale costituente la muratura. Orientativamente è pari:

- *nei pilastri isolati*: all'incirca allo spessore del pilastro;
- *nei muri perimetrali*: da circa 2 ÷ 5 volte lo spessore del muro;
- *nei muri di spina*: a ~ 2 ÷ 6 volte lo spessore del muro.

<sup>4</sup> La diminuzione del pH delle precipitazioni al di sotto dei valori considerati *naturali* (pH 5,6 ÷ 5,8) fa attribuire alle piogge la qualifica di *acide*.

- per effetto della rottura di condutture, serbatoi ed impianti fognari;
- per infiltrazioni dovute ad una non corretta impermeabilizzazione (o per perdite) delle coperture e dei terrazzi<sup>5</sup>;
- per aggressività atmosferica;
- per fenomeni di instabilità;
- per effetto di urti (da traffico veicolare, da traffico ferroviario, da imbarcazioni, da elicottero, etc.);
- per inadeguati particolari costruttivi (di cui alcuni sono rappresentati nella fig. 1.1).

La presenza di dissesti denuncia un comportamento anomalo della struttura che richiede appositi approfondimenti per poter decidere se trattasi di una situazione di pericolo ed in quale misura.

Lo studio dei dissesti<sup>6</sup> delle strutture offre al tecnico ed al costruttore un notevole interesse pratico poiché consente di stabilire le manchevolezze che più comunemente si ripetono nei procedimenti di calcolo<sup>7</sup> e nelle modalità costruttive; permette di modificare e migliorare i regolamenti tecnici laddove essi risultano carenti e consente, infine, l'adozione di metodi ed accorgimenti nuovi per prevenire, contenere o contrastare l'azione di fattori dannosi alle strutture, fattori agenti talora al di fuori della volontà umana.

Nel campo dell'azione legale, uno studio siffatto giova al *consulente tecnico d'ufficio* o al *perito* per stabilire le cause e le colpe e per meglio indirizzarlo nelle sue ricerche critiche.

---

<sup>5</sup> La presenza di acqua nelle murature può dar luogo a:

- degrado per *incompatibilità chimica* di quei materiali del tessuto murario che, in assenza di acque, non generano reazioni chimiche distruttive;
- diminuzione della resistenza termica della muratura e quindi del relativo *comfort*;
- esfoliazione e distacco superficiali degli intonaci per effetto del trasporto verso l'esterno del paramento dei sali dal terreno o dalle zone più interne del muro.

<sup>6</sup> Va segnalato che ad oggi l'*Ente Unificazione Italiana* (UNI), ad eccezione di quanto indicato nella nota 2, o altri enti della *Comunità Europea* non hanno emanato norme di unificazione per l'esame dei quadri fessurativi e dei dissesti. Esiste nell'ambito UNI un progetto di formazione della *sottocommissione strutture* per un tentativo di definizione e rappresentazione delle lesioni e dei dissesti.

<sup>7</sup> Utili indicazioni sui livelli di *affinamento* dei calcoli in vista della durata della vita di servizio di una struttura, sono nel *FIB BULLETIN n° 34/2006: Model code for Service life* dove vengono indicati i seguenti approcci:

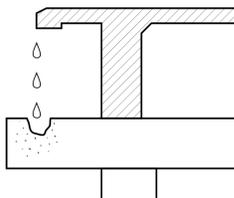
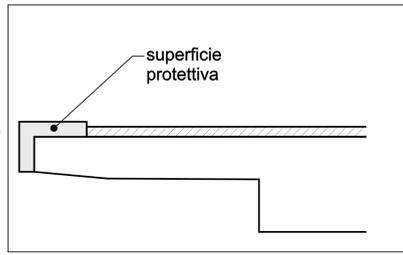
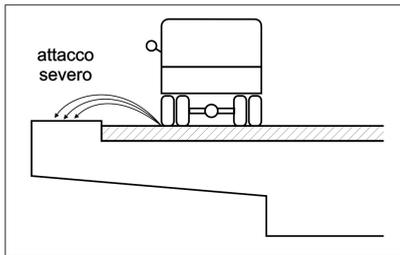
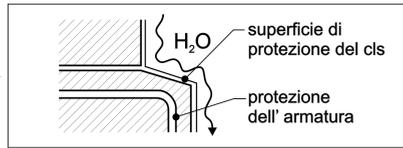
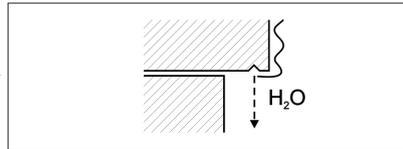
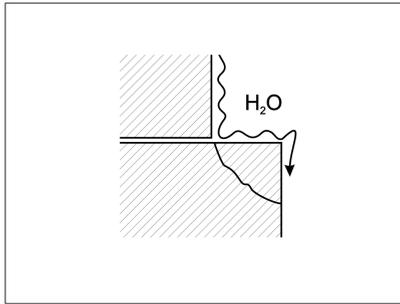
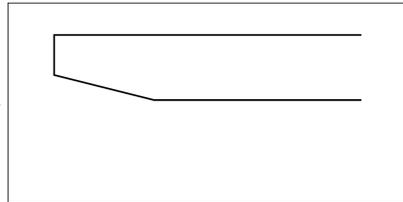
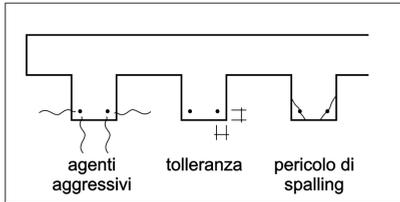
- *completamente probabilistico*;
- *semiprobabilistico*;
- *deterministico idoneo al soddisfacimento dei requisiti di progetto*;
- *idoneo ad evitare il meccanismo di deterioramento*.

PARTICOLARI COSTRUTTIVI

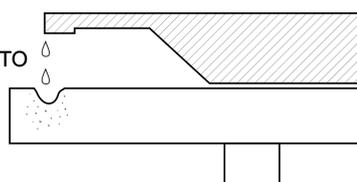
INADEGUATA

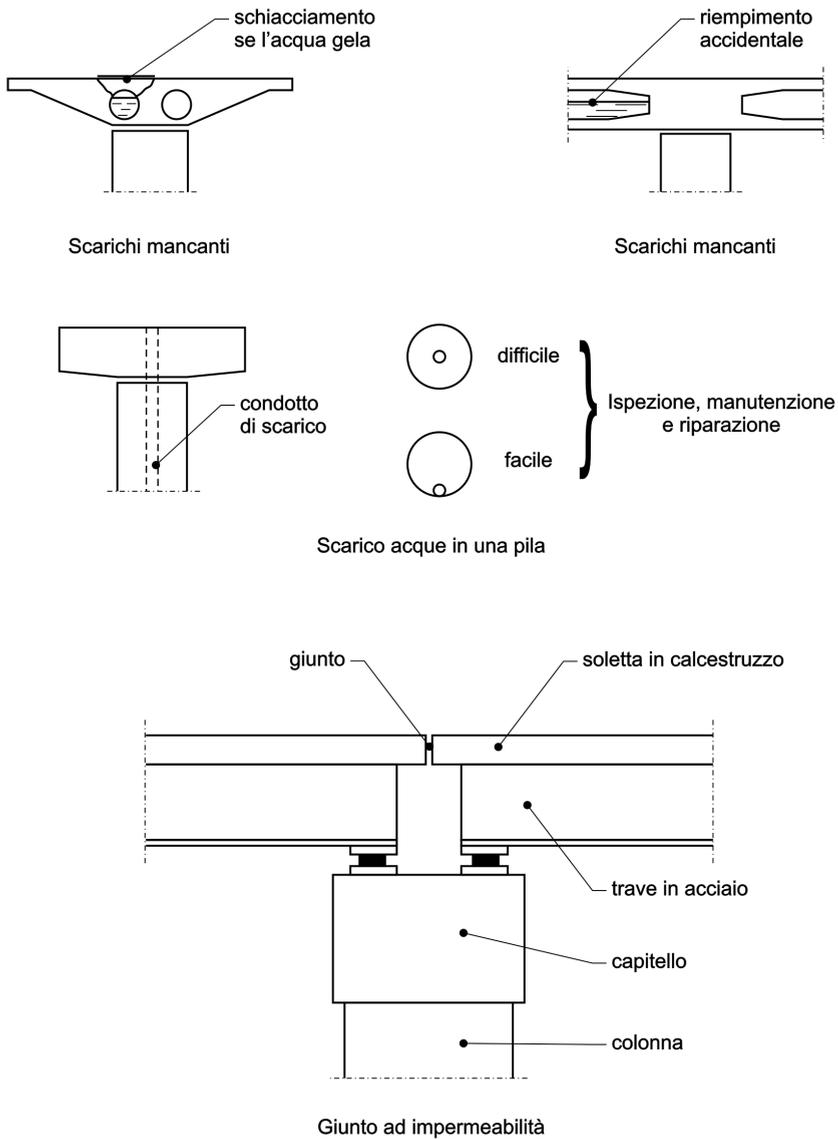
SOLUZIONE

ADEGUATA



DILAVAMENTO





**Figura 1.1. Particolari costruttivi**

## 1.2. Manifestazioni fessurative e loro tipologia

Un *dissesto* si evidenzia attraverso una serie di manifestazioni, assieme o isolate, che nascono per effetto di stati tensionali che la struttura non è più in grado di sopportare e che ne riducono la resistenza locale. Tali manifestazioni vengono classificate a seconda della loro *direzione*, *larghezza* e *profondità*.

Per quanto attiene la *direzione*, si possono avere manifestazioni *longitudinali*, *verticali* (*rettilinee o a dente*), *trasversali*, *diagonali* (*rette o a gradini*), *generiche*.

In merito alla *larghezza* ed alla *profondità* si suole distinguere tra:

a) **fratture sottili**, distribuite sulla superficie, che si manifestano con piccoli spostamenti relativi di punti originariamente contigui. Derivano da una contrazione del volume del materiale in prossimità della superficie o da una dilatazione del volume del materiale al di sotto della superficie o da entrambe le cause. Più propriamente si parla di *cavillature*, se lievi, di *crinature* o *pelature*, se lievi o di forma generica sulla superficie. Talvolta le fratture appaiono come *filature capillari*<sup>8</sup> (ampiezza dell'ordine di grandezza dei  $\mu\text{m}$ ) o *filature* semplicemente (ampiezza  $< 0,5$  mm) tanto piccole da non essere percepite ad occhio nudo.

Le *fratture*, pur non rappresentando in genere un segno di dissesto, si rivelano nocive per la *durabilità* del materiale, specie in ambiente aggressivo (possono consentire l'ingresso di acque meteoriche, acqua, vapore, insetti, etc.). Esse costituiscono quindi un segno di degradazione;

b) **lesioni**: soluzioni di continuità, chiaramente visibili, per rottura del tessuto resistente. Le *lesioni* sono una manifestazione esterna del difetto di funzionamento della struttura.

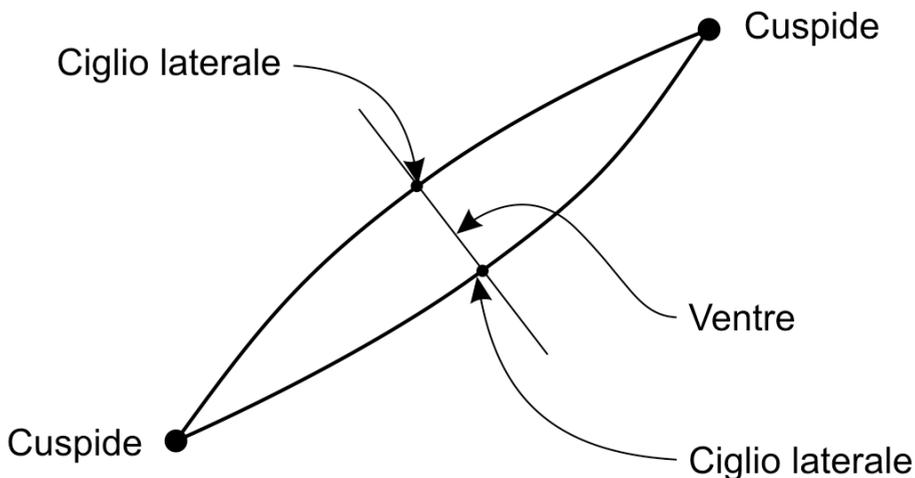
Gli elementi caratteristici di una *lesione* sono (fig. 1.2):

- le *cuspidi*: estremità delle diramazioni sottili delle lesioni;
- i *ventri*: sezioni di maggiore ampiezza delle lesioni dove più evidente è il distacco dei due cigli laterali.

---

<sup>8</sup> Il termine *filatura capillare* appare spesso nella letteratura ingegneristica per descrivere in modo vago un'ampiezza strettissima.

Si tenga presente che lo spessore di un capello nell'area occipitale o del cranio (peraltro variabile con la razza, l'età, l'umidità, la tensione di trazione) ha un diametro medio di 70  $\mu\text{m}$  con una deviazione standard di 20  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-3}$  cm).



**Figura 1.2.** Elementi caratteristici di una lesione

Nella tab. 1.1 le manifestazioni fessurative sono classificate secondo indicazioni di letteratura.

Con la dizione *passante* si vuole sottolineare che una stessa manifestazione attraversa completamente lo spessore dell'elemento strutturale presentandosi visibile su entrambe le sue superfici.

Secondo alcuni autori, con riferimento alla struttura in elevazione, l'**entità del danno** può essere così classificata:

- **GRADO A, lesioni lievi:** lesioni semplici isolate di piccola ampiezza (< 5 mm) dovute principalmente a flessione o a cause secondarie;
- **GRADO B, lesioni serie:** molte lesioni flessionali, o lesioni da taglio isolate, ma di piccola ampiezza < 2,5 mm;
- **GRADO C, danni gravi:** lesioni di rilevante ampiezza (> 10 mm se verticali o di 5 mm se inclinate), disorganizzazione del tessuto murario, danni agli architravi, ai cordoli, etc.

I dissesti in un organismo strutturale, per quanto attiene la loro *estensione*, possono avere carattere:

- **locale:** se interessano un elemento strutturale e non si ripetono per quelli tipologicamente analoghi. Così, ad es., un rampante lesionato di una scala è da considerarsi *dissesto locale*;
- **globale:** se interessano il complesso degli elementi strutturali. Ad es., se tutti i rampanti di una scala sono lesionati, il dissesto è da ritenersi *globale*;

- **limitati**: se interessano da 1/3 fino a 2/3 degli elementi strutturali; ed essere di tipo:

**Tabella 1.1.** Manifestazioni fessurative classificate secondo la loro ampiezza

FONTI	CLASSIFICA
BIDWELL (*)	sottile > 1,5 mm medie 1,5÷10 mm ampie > 10 mm
RAINER (**)	molto sottili < 1 mm esili 1÷5 mm moderate 1÷15 mm severe > 15 mm
KAMINETZKY (***)	trascurabili < 0,1 mm (****) molto leggere 0,1 ÷ 0,4 mm leggere 0,8 ÷ 3,2 mm moderate 3,2 ÷ 12,7 mm estensive 12,7 ÷ 25,4 mm molto estensive > 25,4 mm
(*) <b>BIDWELL, T.G.</b> –	The conservation of brick buildings. The repair, alteration and restoration of brickwork – London, BDA, pag. 6, 1977.
(**) <b>RAINER, P.</b> –	Movement control in the fabric of buildings. New York, Nichols Publishing Co, 1983.
(***) <b>KAMINETZKY, D.</b> –	Verification of structural adequacy. Rehabilitation, renovation and preservation of concrete and masonry structures, Detroit, Mi, ACI 141, 1985.
(****)	0,1 mm. è la minima ampiezza alla quale può penetrare l'acqua da pioggia battente.

- **diretto** quando coinvolgono gli elementi portanti e si manifestano generalmente con *moti rigidi, deformazioni e fessurazioni*. Talvolta si hanno dissesti dovuti solo a moti rigidi. In questo caso, la struttura si allontana dalla posizione originaria conservando la propria geometria. In conseguenza degli spostamenti dei carichi rispetto alle sezioni resistenti, un moto rigido altera il regime tensionale nella struttura e nell'impianto fondale;
- **indiretto** quando relativi agli elementi costruttivi secondari: quelli *portati* (tompagni, tramezzi, soglie di vani, superfici di intonaco, rivestimenti e cornici in pietra, gradini, canali di gronda, tubazioni, etc.). Questi tipi di dissesti, anche se non incidono sulla sicurezza del

complesso strutturale, costituiscono comunque fonte di pericolo (per la loro caduta, ad es.) e possono leggersi come segni di conseguenze deformative derivanti dall'aver interessato il manufatto senza provocare su di esso danni strutturali.

Circa la *natura* delle manifestazioni fessurative, si possono avere lesioni di *trazione* o di *schacciamento*.

La differente frequenza e pericolosità dipendono dal maggior valore della resistenza a compressione rispetto a quella a trazione esibita dal materiale nonché dai criteri di progettazione. Nella concezione statica, infatti, sia nel caso della muratura che del conglomerato cementizio con armatura lenta, si fa affidamento solo sulla *resistenza a compressione*, per cui se questa viene a mancare può aversi il collasso dell'intera costruzione, mentre la *resistenza a trazione* può essere superata facilmente per qualsiasi fattore accidentale, senza che ciò, in generale, alteri in modo sostanziale il comportamento d'insieme.

Le *lesioni di trazione* creano delle soluzioni della continuità preesistente nella compagine della struttura lasciando però con le proprie caratteristiche meccaniche le parti che ne vengono separate; pertanto se il processo non si estende e l'ampiezza della lesione resta contenuta, il fenomeno può considerarsi circoscritto. In tal caso, l'alterazione dello schema strutturale per l'apparire della lesione potrebbe essere considerato trascurabile. Ove invece si riscontrasse che l'ampiezza della lesione va crescendo nel tempo, è da pensare ad un moto in atto, che non si è esaurito all'apparire della lesione, la cui presenza ha anzi rappresentato l'inizio di un fenomeno in processo evolutivo, quale può essere, ad esempio, un cedimento fondale o anche lo schiacciamento di un elemento murario su cui insiste la struttura.

Le *lesioni di trazione* si verificano laddove si desta una tensione di trazione alla quale la struttura non è in grado di resistere. Ad es. nel caso di un arco in muratura la tensione di trazione può essere conseguenza di una forza normale di compressione il cui centro di pressione sia fuori del *nocciolo centrale di inerzia* (lesioni in chiave degli archi o nei piedritti sottoposti a spinte eccessive rispetto ai carichi assiali; *ultra* § 5).

Le *lesioni di trazione* sono assai meno insidiose dello *schacciamento* sia per la loro maggiore evidenza sia perché, come si è già accennato, segmentando la struttura in più elementi, consentono in genere ancora nuove situazioni di equilibrio.

In un materiale poco resistente a trazione, le prime manifestazioni si evidenziano nelle zone tese.

Per individuare la direzione in cui si sviluppano le lesioni occorre tener conto delle *isostatiche*<sup>9</sup> il cui andamento nella fase iniziale non si discosta da quello in regime elastico, anche se si è in un campo di comportamento non lineare del materiale.

La lesione, infatti, nella fase iniziale, si innescherà normalmente alle isostatiche corrispondenti alle tensioni di trazione.

Alla formazione della prima lesione si ha una redistribuzione delle tensioni e conseguentemente una variazione delle isostatiche.

Nello sviluppo successivo, tuttavia, una lesione può *stabilizzarsi* o continuare ad evolversi senza seguire necessariamente l'isostatica originaria in quanto, come si è detto, a seguito della variazione dello schema resistente conseguente all'apparizione della lesione, le isostatiche stesse si modificano.

Possono quindi presentarsi nuove lesioni ed in zone anche del tutto diverse.

Il raggiungimento dei valori di rottura in una o più zone non corrisponde necessariamente al collasso dell'elemento, ma rappresenta una modifica del meccanismo resistente, chiamando, quanto possibile, le zone integre ad una maggiore collaborazione.

Lo stadio estremo o *fase delle grandi lesioni*, infatti, si verifica all'estendersi e congiungersi delle prime lesioni.

Sono allora ancora possibili equilibri stabili se i movimenti delle varie parti, in cui le lesioni decompongono l'intera struttura, risultano efficacemente contrastati.

Per le strutture in *conglomerato cementizio armato* il quadro fessurativo può essere alterato da un'anomala distribuzione delle armature e dall'interferenza di elementi non strutturali. Inizialmente sono i pannelli e le tamponature dei telai (quando presenti) a sopportare la maggior parte delle sollecitazioni ed a mostrare quindi i segni più visibili di dissesto dopo che sono avvenute le prime deformazioni d'insieme.

La completa individuazione della distribuzione delle lesioni può ottenersi solo con un procedimento *passo-passo* in cui si tenga conto, di volta in volta, dell'effettivo schema resistente della struttura.

Nel caso dell'inserimento di elementi resistenti a trazione (armature lente per il conglomerato cementizio armato, tiranti per le murature) si altera naturalmente la distribuzione delle tensioni (e quindi delle lesioni),

---

<sup>9</sup> Vedi *ex plurimis* – **Menditto G.**, *Lezioni di Scienza delle Costruzioni*, vol. II, parte Prima, Pitagora Editrice Bologna, 2000.

consentendo di raggiungere l'equilibrio con meccanismi resistenti diversi da quelli formati in presenza del solo materiale di origine (conglomerato o muratura). In una prima fase tuttavia le lesioni assumono spesso una configurazione analoga a quella di un elemento non armato essendo vinta la resistenza a trazione del materiale prima che entri in gioco l'elemento inserito per fronteggiare la trazione stessa.

Le lesioni possono insorgere anche dopo un certo periodo dal manifestarsi della causa perturbatrice per una specie di inerzia della massa delle strutture.

Le *lesioni recenti* si riconoscono per essere chiare, quasi brillanti, pulite, a bordi netti e chiaramente definiti, con cigli di frattura a spigolo vivo, con superficie di rottura di tipo cristallino, mentre quelle *pregresse* (vetuste) presentano fratture rese annerite e polverose dal tempo con ciglie smussate e mal contornate (superfici di rottura non più nette e non di rado frammenti di ragnatele)<sup>10</sup>.

L'invecchiamento delle superfici di frattura varia d'altra parte a seconda dell'ambiente con cui sono a contatto (locali scantinati umidi e con presenza di muffe, aria inquinata per la presenza di gas corrosivi, etc.) per cui è sempre problematico risalire all'età delle fratture stesse attraverso il loro esame diretto a meno che non si disponga di una *storia* documentata delle condizioni di stabilità dell'edificio.

Le fratture pregresse sono il sintomo di *vecchi* dissesti che possono essersi esauriti nel tempo o perché le strutture hanno trovato un nuovo assetto di equilibrio o per l'esecuzione di lavori di consolidamento.

Nel caso invece che un *nuovo* dissesto si instauri per le medesime cause che provocarono quello *vecchio* o anche per altre cause, ma che comporti una sovrapposizione dei quadri fessurativi vecchio e nuovo, è probabile che le vecchie fratture, per un certo periodo di tempo rimaste inattive, riprendano la loro progressione fessurativa. Ciò sarà riconoscibile dalla differenza fra le superfici di frattura, che appariranno *vecchie* nelle zone intorno al ventre e *nuove* verso i limiti di cuspidè.

Il nuovo movimento sarà accertabile e qualificabile con gli appositi strumenti di controllo<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Ove non sia possibile l'ispezione diretta della superficie di frattura per il carattere *capillare* delle lesioni, è sufficiente estirpare dei frammenti di materiale dalla parte di uno dei cigli e confrontare la superficie di frattura fresca con quella da esaminare.

<sup>11</sup> Per il monitoraggio dei quadri fessurativi si rimanda a **G. Menditto, S. Menditto**, *Indagini semidistruttive e non distruttive nell'ingegneria civile: disciplina tecnica, applicativa e normativa*. Cap. 4, Pitagora Editrice, Bologna, 2008.

Le lesioni vanno esaminate sempre sulla *struttura nuda* rimuovendo limitate regioni di intonaco nel *ventre* ed in vicinanza delle *cuspidi* delle fessurazioni e lasciando intatti i restanti tronchi e le cuspidi stesse, per rendere più evidente il confronto tra le fessurazioni superficiali e quelle profonde. Può infatti accadere che le fessurazioni abbiano ad interessare solamente l'intonaco a seguito di contrazione dello stesso e quindi non siano attribuibili a deficienze strutturali.

Nei muri vetusti le fessurazioni dell'intonaco possono avere ampiezza più limitata che nella massa muraria. In taluni casi, soprattutto quando l'intonaco raggiunge spessori notevoli per successive *ricariche*, si può verificare che il muro risulta integro, mentre l'intonaco presenta un variegato quadro fessurativo.

Le indagini vanno estese a quelle parti di strutture non direttamente visibili o ispezionabili (p. es. rivestimenti delle pareti con stoffe, legno, marmo, etc.) e che possono mascherare manifestazioni anche gravi.

### 1.3. Semiotica dei dissesti

L'interpretazione dei segni esterni dei dissesti, avendo questi un loro modo di manifestarsi, può essere definita come la *semiotica dei dissesti*. È pertanto importante conoscere ai fini diagnostici la loro natura, collocazione, entità ed evoluzione rilevabile nel tempo con il tracciamento di diagrammi tempo-ampiezza<sup>12</sup> (*curve cinematiche o diagrammi cronologici della deformazione*).

Va preliminarmente rilevato che alcuni segni di un movimento di una struttura possono derivare anche da elementi marginali. Per es. l'improvvisa difficoltà di apertura di una porta o di una finestra può dipendere dalla deformazione del vano che la contiene (*ultra* § 2.2.9.2.) il che costituisce segno di un dissesto di tipo *diretto*, se il vano è ricavato in una pannellatura portante o di *tipo indiretto*, se è praticato in un tramezzo o in una tamponatura. Analogamente segni di scricchiolii avvertiti da più

---

La letteratura tecnica di settore distingue tra:

- *fessurografia* che è il rilievo datato e sistematico delle fessure e quindi della loro evoluzione temporale (larghezza e profondità delle fessure);
- *fessurometria* che è la misura del movimento relativo dei cigli laterali della fessura sotto l'azione di carichi esterni.

<sup>12</sup> Il cui andamento può essere *costante, ritardato, ciclico* (Cfr., p. es., testo richiamato nella nota 11).

persone possono essere il sintomo di fratture che vanno creandosi nella struttura del manufatto. È importante anche accertare preliminarmente se il dissesto sia *reale o apparente* nel senso che abbia o no ad interessare la struttura.

Così ad es. come *apparenti* possono presentarsi talvolta le fratture sulla superficie degli intonaci. Una rifazione dell'intonaco su una superficie muraria dà luogo con il tempo all'apparizione di cavillature reticolari, a maglie più o meno ampie, nei cui vertici concorrono rami prevalentemente rettilinei. Ciò è conseguenza del *ritiro* del materiale di formazione dell'intonaco che tende a diminuire di volume in ciò contrastato dalla muratura cui aderisce. Ne conseguono tensioni di trazione nell'intonaco che, una volta superata la relativa resistenza, provocano le *cavillature*. In tal caso, come si è già detto, è opportuno spicconare l'intonaco ed ispezionare lo stato della sottostante struttura nuda.

Nelle strutture murarie un tipico *dissesto apparente* si rileva talvolta in zone ristrette della superficie della pannellatura in corrispondenza dei cosiddetti *fori d'andito* che nel passato venivano lasciati per alloggiarvi le travi in legno a sostegno appunto degli anditi. Analoghe manifestazioni si presentano in corrispondenza di canne fumarie, anche se non in esercizio, poiché a causa della riduzione che esse operano della sezione resistente muraria si crea una concentrazione di tensioni con valori locali elevati. Stesso discorso vale per quei vani che sono stati tamponati in tempi successivi all'ultimazione della costruzione. Con il tempo è possibile infatti notare lesioni lungo il contorno del vano a seguito del rassetto della muratura diOMPAGNO. Manifestazioni di *dissesto apparente* si sono presentate, sotto forma di *crinature*, in corrispondenza della presenza nel corpo murario di elementi lignei isolati sotto forma di tavole o intelaiati secondo antiche prescrizioni antisismiche (*ultra* § 2.1). Queste crinature si distinguono per l'atipicità del loro manifestarsi avendo lunghezza limitata a non più di 10 cm, presentandosi fitte in verticale, inclinate da sinistra verso destra con la pellicola della pittura leggermente sollevata. Anche in questo caso si rende necessario lo spicconamento dell'intonaco e l'esame della sottostante superficie.

#### **1.4. Quadri fessurativi**

L'esame della forma, l'andamento e l'ampiezza delle lesioni, l'analisi degli spostamenti della parte del materiale che è traslata rispetto alla

parte contigua rimasta nella sua posizione originaria, ovvero del moto di ciascuna delle due parti, possono far risalire alle cause di un dissesto classificandole secondo la *tipologia* (distacco, rotazione, scorrimento, spostamento fuori del piano, etc.).

Si rende allora necessaria una visione di insieme delle lesioni riportandole sui prospetti del manufatto. Tale rappresentazione grafica delle lesioni si denomina *quadro fessurativo*.

Nella tab. 1.2 vengono date alcune indicazioni per la rappresentazione in pianta delle più ricorrenti manifestazioni di degrado e dissesti.

Talvolta è necessario avere una visione contemporanea dei dissesti che interessano anche la connessione delle varie pannellature. Si possono allora riportare i quadri fessurativi su cartoncini che vengono successivamente assemblati tra loro seguendo l'andamento planimetrico del manufatto. Per strutture più complesse è opportuno ricorrere a modelli tridimensionali (per es. in *plexiglas*).

È altresì possibile utilizzare la tecnica di *fotogrammetria architettonica* (o *fotogrammetria dei vicini*) per elaborare immagini grafiche di un edificio con precisioni dell'ordine del centimetro per i sistemi meno sofisticati e del millimetro per quelli che utilizzano macchine fotografiche di tipo metrico e che quindi consentono di rilevare lo stato di fessurazione e di seguirne l'evoluzione. Tuttavia la precisione che si ottiene non permette di quantificare l'ampiezza delle fessure né, soprattutto, le sue variazioni nel tempo (fig. 1.3).

Possono utilmente impiegarsi codici di calcolo che consentono la rappresentazione tridimensionale del manufatto con possibilità di visionarne gli interni.

L'osservazione di insieme di una struttura porta infine ad un'individuazione sintetica degli aspetti geometrici più appariscenti perché anomali rispetto a quanto ci si può aspettare in una struttura eseguita a *regola d'arte (leges artis)*<sup>13</sup>. L'osservazione consente di

---

<sup>13</sup> *Le regole dell'arte (leges artis)* sono:

- un insieme di prescrizioni non formalizzate attinenti all'arte di edificare attraverso la letteratura tecnica *pre-moderna* che le ha mutate dalla tradizione costruttiva di decenni di esperienze tramandate nel tempo per via orale dalla mano d'opera o desunta dalle fabbriche esistenti. Le *regole dell'arte* raccolgono quindi gli insegnamenti tratti dalle esperienze che connotano la storia delle costruzioni e riguardano procedimenti costruttivi consolidati e stabili nell'impiego di materiali e nella tecnica di realizzazione;
- le modalità tecniche di esecuzione delle varie categorie di lavori per costruzioni (edili, stradali, idrauliche, etc.) *prescritte dalle leggi e decreti* come le norme per le

pervenire ad un giudizio sintetico sulla struttura impiegando sistematicamente *indicatori di danno* con metodologie mutuata dall'ingegneria sismica. In definitiva, si tratta di assegnare un punteggio ai principali componenti della struttura. Ad es. questa viene divisa in quattro componenti principali (**macroelementi**: *fondazioni, coperture, elementi orizzontali, elementi verticali*) ed a ciascuno di esso vengono assegnati:

- punti 0 per nessun danno visibile;
- punti 1 per danni leggeri per gravità ed estensione;
- punti 2 per danni gravi ma limitati per estensione;
- punti 3 per danni leggeri ma estesi;
- punti 4 per danni medi ed estesi;
- punti 5 per danni gravi ed estesi.

Il punteggio globale (compreso, nel caso illustrato, tra 0 e 15) consente una prima valutazione complessiva delle condizioni strutturali, soprattutto quando l'osservazione interessa contemporaneamente più edifici paragonabili per tipologia, utilizzo e ubicazione.

L'osservazione di insieme deve basarsi sulla presenza di:

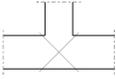
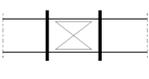
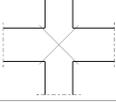
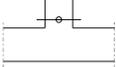
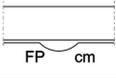
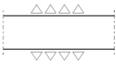
- cedimenti delle fondazioni;
- spanciamiento o fuori piombo delle pareti;
- lesioni passanti su pareti, archi e volte;
- avvallamenti e/o sfondellamento dei solai;
- rotture di travi e capriate;
- rotture o deformazioni di elementi in ferro;
- disomogeneità dei materiali;
- tracce di interventi effettuati nel passato.

---

opere in c.a., in zone dichiarate sismiche, etc. e come quelle contenute in *capitolati speciali-tipo* approvati dall'(ex) Ministero dei Lavori Pubblici (oggi Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), norme tutte che sono da applicare con carattere cogente o in forza di contratto di appalto (Cfr. art. 1662 c.c.) o, in mancanza, come quelle del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.) o dell'U.N.I. o quelle contenute nei trattati o testi autorevoli di *Scienza e Tecnica delle Costruzioni* (così Cass. n° 658, 1956);

- per i manufatti **storici** il complesso delle prescrizioni, suggerimenti ed intuizioni nelle quali si sostanzia l'*ars* degli antichi costruttori. In questi casi la *regola dell'arte* può essere assunta come *criterio di affidabilità* strutturale non meno rigorosa dei moderni algoritmi.

**Tabella 1.2.**  
 DEGRADO E DISSESTO  
 (rappresentazione in pianta)

	Lesione isolata		Lesione diffusa
	Lesione a croce		Lesione di architrave
	Lesione a martello		Schiacciamento (con espulsione di materiale)
	Lesione incrocio		Crollo
	Discontinuità fra murature perpendicolari		Orditura di solaio inflessa
	Strapiombo della muratura (-interno, +esterno)		Orditura di solaio molto fatiscente
	Area di cedimento delle fondazioni		Umidità
	Lesione cantonale		dissesto della pavimentazione
	Lesioni volta		



**Figura 1.3.** Impiego della fotogrammetria architettonica

Le valutazioni proposte richiedono di essere arricchite e rese maggiormente dettagliate, specie quando la struttura appare più vulnerabile. Vanno considerati pertanto degli *indicatori di vulnerabilità*<sup>14</sup> che possono fornire dei suggerimenti “a priori” sul livello di sicurezza globale dell’edificio e quindi sulla probabilità più o meno alta di esistenza di danni (Tab. 1.3).

### 1.5. Lettura dei quadri fessurativi

L’ispezione del quadro fessurativo (apertura, chiusura, dislocazione di una fessura), mediante confronto tra lesioni presenti e quelle caratteristiche di fenomeni noti, può fornire un’idea dell’andamento delle *isostatiche*. Va però rilevato che un determinato dissesto può essere provocato da più cause perturbatrici variamente combinate, sicché non è sempre agevole individuarle in modo univoco (*ad un dissesto strutturale non corrisponde un’unica causa perturbatrice*). Un dissesto di

<sup>14</sup> La *vulnerabilità* è la propensione al danno dell’esposto.

È una misura della *fragilità* del sistema, della sua incapacità di resistere al fenomeno pericoloso.

traslazione verticale può essere dovuto ad eccessiva compressibilità del piano di posa, allo schiacciamento della struttura di base, alle deformazioni di travi o di archi di fondazione, ad eccessivo scorrimento dei pali di fondazione, etc.

**Tabella 1.3.** Indicatori di vulnerabilità (opere murarie)

Per il <i>suolo di fondazione</i>	- la presenza di argilla e torba - la presenza di falde acquifere superficiali
per le <i>fondazioni</i>	- l'utilizzo di una tipologia a fondazioni discontinua - lo scarso approfondimento
per le <i>pareti verticali</i>	- l'eccessiva altezza dell'edificio - la snellezza delle pareti (altezza di interpiano) - l'uso di pareti a secco - l'alta percentuale di nicchie e aperture - l'irregolarità in elevazione - il basso rapporto tra superficie delle pareti e la superficie totale - la mancanza di ammorsamenti tra le pareti - la distribuzione asimmetrica o non regolare delle pareti in pianta - l'assenza di intonaco
per gli <i>orizzontamenti</i>	- l'uso di solai flessibili - la mancanza di ammorsamenti - l'uso di volte senza catene
per le <i>coperture</i>	- l'assenza di catene - una scarsa manutenzione del materiale di <i>coperta</i> (p. es. le tegole) e delle gronde
per le <i>tipologie</i>	- l'irregolarità geometrica - la presenza di sbalzi - la presenza di elementi spingenti (muri di sostegno, archi senza catene, volte)
per l' <i>uso</i>	- l'uso di materiali poveri - l'evidenza di rimaneggiamenti successivi - la presenza di edifici adiacenti più recenti - l'evidenza di cambi di uso - la presenza di macchine vibranti

La valutazione dell'intensità delle azioni che hanno provocato il dissesto di una costruzione richiede generalmente una procedura di *tipo iterativo*, che consiste nell'ipotizzare una determinata distribuzione delle stesse e nell'identificare il corrispondente stato di danneggiamento diffuso (in termini, ad esempio, di distribuzione ed ampiezza delle fessure, di

plasticizzazione delle sezioni e di intensità delle deformazioni residue negli elementi strutturali).

Quali *azioni* effettivamente applicate alla costruzione si assumeranno quindi quelle che meglio riproducono il quadro dei dissesti rilevato attraverso l'*ispezione in situ*.

Il problema risulta talvolta complesso, o comunque di risoluzione molto onerosa dal punto di vista computazionale, se lo schema strutturale resistente è composto da un numero elevato di elementi, o se, per effetto della distribuzione funzionale degli spazi e della storia passata della costruzione, si sono verificate forti variazioni dei carichi da zona a zona e nel tempo e se il dissesto ha subito un'evoluzione progressiva a cui è corrisposta una contemporanea alterazione graduale dello schema statico. Inoltre è sempre difficile e quantomeno incerta la stima degli effetti delle azioni ambientali, di natura chimica o fisica, del degrado naturale dei materiali e delle distorsioni.

Un metodo semplificato di analisi consiste nell'eseguire le indagini isolatamente a livello di ciascun elemento, determinando lo stato di sollecitazione a cui corrisponde il quadro di dissesti effettivo e quindi risalendo da esso ad una prevedibile distribuzione delle azioni accidentali.

Procedure più affinate, caratterizzate da un grado variabile di complessità, possono essere in genere adottate nel caso in cui il dissesto sia imputabile ad un ben definito tipo di azione.

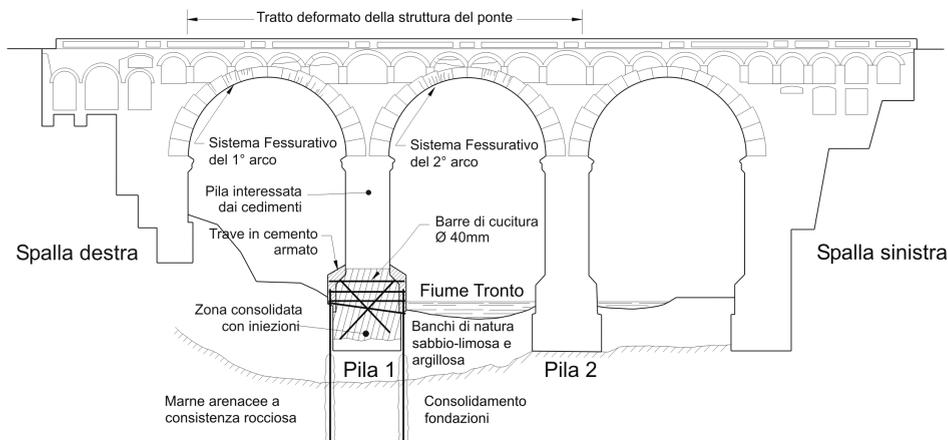
A titolo esemplificativo, con riferimento al caso dell'azione sismica, si può allora operare o *in modo parametrico*, variando l'intensità dell'accelerazione applicata alla base della costruzione ed adottando poi quella che determina la distribuzione dei danni effettivamente osservata, o *direttamente*, utilizzando le registrazioni relative all'evento sismico considerato ed impiegando programmi di calcolo di *comprovata affidabilità*, che permettano di tener conto, con diverso grado di precisione, della propagazione delle onde sismiche nel suolo e dei complessi fenomeni di interazione terreno-fondazione-struttura.

Ad illustrazione di quanto sopra, valga l'esame di un ponte in muratura<sup>15</sup> in cui si era manifestato il quadro fessurativo illustrato in fig. 1.4 a seguito del cedimento della pila n° 1. Lo studio fu affrontato osservando che nella definizione del modello di comportamento statico era

---

<sup>15</sup> **Menditto G. et alii** – Consolidamento statico del Ponte di Campo Parignano ad Ascoli Piceno. *L'Industria Italiana del Cemento* n° 668, luglio-agosto 1992.

necessario tener conto in maniera adeguata sia delle parti non propriamente strutturali, quali i rin fianchi degli archi ed i timpani, sia delle parti strutturali secondarie, quali le volte di scarico (*archetti*).



**Figura 1.4.** Quadro fessurativo rilevato in situ

Pertanto si mise a punto un modello piano, simulando opportunamente la presenza dei rin fianchi e degli archetti secondari e, successivamente, si pervenne ad un modello di comportamento spaziale tenendo conto anche dei timpani.

La scelta del modello piano fu effettuata per successivi affinamenti: si partì dallo schema strutturale elementare di arco a tutto sesto incastrato alle estremità, per passare a quello incastrato alle reni (in sezioni inclinate di 30 gradi) e quindi agli stessi con l'aggiunta di una o più bielle introdotte per simulare l'effetto irrigidente dei rin fianchi (Fig. 1.5).

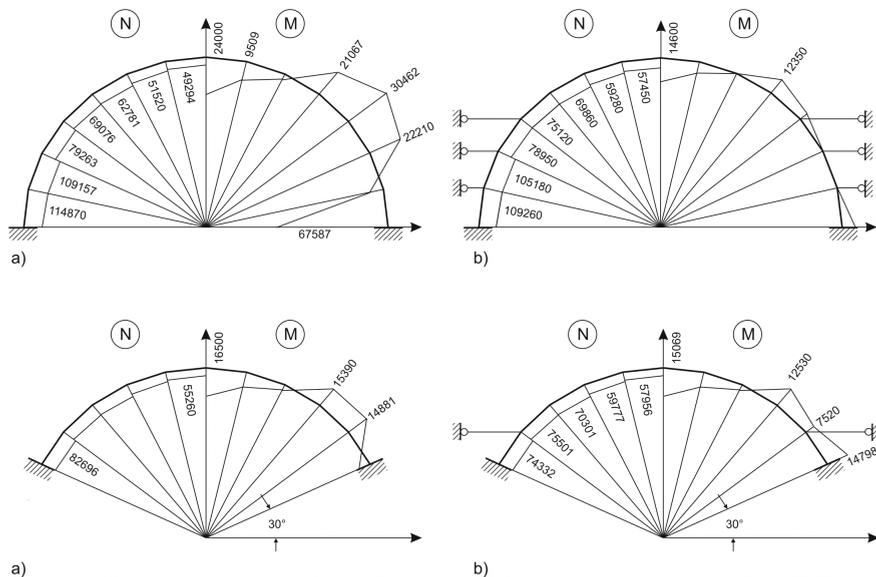
L'affinamento del modello fu pilotato dal confronto tra il regime tensionale trovato ed i valori medi indicati dal progettista e comunque verificando la condizione, sicuramente soddisfatta a manufatto integro, di avere la *curva delle pressioni* interna al nocciolo centrale d'inerzia.

Per tener conto del carattere unilaterale dell'azione di contrasto del rin fianco, si controllò che la sollecitazione nelle bielle fosse sempre di compressione.

Su questo schema gli archetti secondari assumevano la sola funzione di trasmettere il carico permanente ed accidentale all'arco principale che risultava pertanto sottoposto a forze verticali concentrate nelle sezioni di imposta degli archetti.

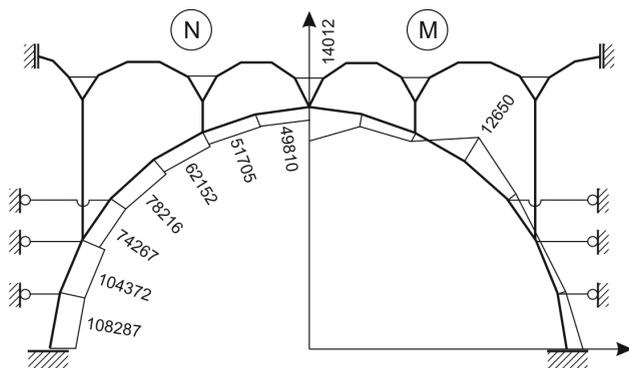
Ripetendo su ognuna delle tre campate lo schema costruito per la

semplice arcata e introducendo le due pile, si pervenne ad un modello piano di prima approssimazione capace di tener conto in modo soddisfacente dei rinfianchi degli archi.



**Figura 1.5. Modelli piani di comportamento**

Successivamente, considerando gli archetti secondari come facenti parte della struttura, si pervenne allo schema a molte iperstatiche (Fig. 1.6) nel quale l'arco principale, pur restando l'elemento essenziale, era affiancato, nella funzione portante, dagli archetti.



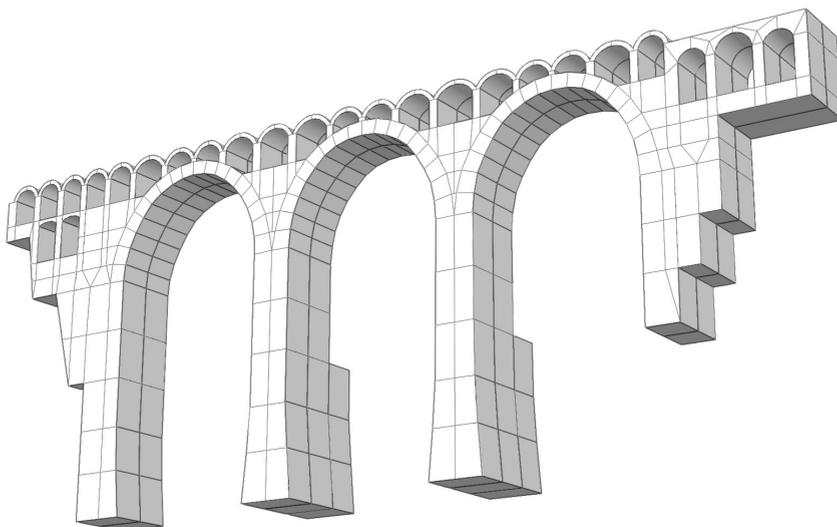
**Figura 1.6. Schema a malte iperstatiche**

Il modello così costruito, che può riferirsi ad una porzione unitaria o all'intera larghezza dell'impalcato, consentì di valutare con buona attendibilità le sollecitazioni derivanti dalle azioni permanenti e dai carichi mobili se disposti in asse alla struttura e distribuiti uniformemente in senso trasversale.

I carichi vennero disposti seguendo le indicazioni delle *linee di influenza*<sup>16</sup> in modo da ottenere le massime sollecitazioni sugli elementi principali della struttura. Non fu però possibile valutare gli effetti prodotti dai carichi eccentrici.

Per tener conto di quest'ultima condizione e per cogliere l'effettivo comportamento spaziale del complesso, si fece ricorso ad una discretizzazione in *elementi finiti* dell'intera struttura introducendo l'effettiva larghezza del ponte e dei timpani laterali. Gli archi diventarono porzioni di volte cilindriche irrigidite dai timpani interposti tra i due ordini di archi.

Nella Fig. 1.7 è riportata una vista assonometrica del modello spaziale relativo a metà impalcato che consentì una lettura immediata della discretizzazione operata facendo ricorso ad elementi tridimensionali.



**Figura 1.7.** Modello spaziale: vista assonometrica

<sup>16</sup> *Ex plurimis:*

**Menditto G.**, *Lezioni di Scienza delle Costruzioni*, vol. III, Parte I – Strutture monodimensionali, Pitagora Editrice, Bologna, 2001.