



in collaborazione con  
Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale  
Università di Napoli Federico II

Un approccio metodologico  
alla nuova tecnologia edilizia  
per il recupero  
strutturale e la durabilità  
e la manutenzione

**UN APPROCCIO METODOLOGICO AL  
RECUPERO STRUTTURALE NEI  
CONFRONTI DELLA DURABILITA' E  
MANUTENZIONE**

GIORGIO BRUNETTI, TECNITER di Milano,  
PIERANGELO FELOTTI, CEAS di Milano,  
ARTURO DONADIO - GIOVANNA POME',  
S.P.S. di Milano

# UN APPROCCIO METODOLOGICO AL RECUPERO STRUTTURALE NEI CONFRONTI DELLA DURABILITA' E MANUTENZIONE

GIORGIO BRUNETTI, TECNITER di Milano,  
PIERANGELO FELOTTI, CEAS di Milano,  
ARTURO DONADIO - GIOVANNA POME',  
S.P.S. di Milano

## SUMMARY

*The objective of this study is to provide guidelines regarding the techniques used for the structural restoration of structures where the aim is to provide a high level of durability and to prepare a long term maintenance plan for the structure in question.*

*The study examines the methods used for structural analysis, giving to the same an engineer validity.*

*This is the first of the three phases involved in obtaining the final project for the restoration of a structure.*

*In the second phase, using practical examples, the results of the structural analysis which is acurred in increasing detail, are compared.*

*The results of these two phases are compared in order to consider the possibility of overlapping experimental results with results obtained with calculations.*

*The result of this comparison will form either the basis of the project or will highlight the need for further investigation.*

*The various aspects of the project will be closed, examined with particular reference to the durability and maintenance requirements of the structures.*

*The phases conered so far are summatized in a blok diagram, which represents the logical flow of the methodology.*

## 1. INTRODUZIONE

Il lavoro in oggetto intende costituire un contributo a riguardo della metodica progettuale relativa al recupero strutturale, ove questo abbia lo scopo di perseguire la durabilità dell'opera, evidenziandone gli aspetti programmatici di manutenzione.

La memoria sviluppa i metodi di indagine strutturale, assegnando a questi un "range" di validità ingegneristica.

Questo aspetto risulta essere il primo dei tre passi logici da compiersi per giungere al progetto di recupero.

Con esemplificazioni pratiche, vengono comparati risultati di analisi strutturale, svolta con complicazione crescente, inclusa l'analisi agli elementi finiti piani o spaziali in campo lineare e non lineare.

I due aspetti fin qui descritti saranno posti a confronto al fine di evidenziare le possibilità pratiche di "sovrapporre" realtà sperimentali a previsioni da tavolino.

Da questo confronto nasce un input per il progetto oppure, talvolta l'esigenza di ulteriori approfondimenti.

Gli aspetti progettuali saranno quindi discussi con particolare riferimento ai requisiti di durabilità e di manutenibilità dell'opera.

Le operazioni descritte sono in conclusione riassunte in uno schema a blocchi, costituente il flusso logico della metodica progettuale.

## 2. I METODI DI RICONOSCIMENTO ED INDAGINE DELLE STRUTTURE

Le tecniche di indagine sperimentali di tipo non distruttivo consentono, allo stato dell'arte, di raggiungere elevati livelli di conoscenza strutturale e di valutare l'efficienza statica dell'opera.

Molto spesso però l'uso dei dati ricavati durante la campagna di indagine può risultare complesso ed il numero dei dati stessi inadeguato.

Infatti è abbastanza frequente il caso in cui il progettista si trovi a dover utilizzare risultati non chiaramente elaborati e interpretabili o apparentemente discordanti.

E' dunque estremamente importante, che sia definito il programma delle indagini, operazione delicata e di basilare importanza per assicurarne il successo.

La scelta del tipo e del numero delle indagini deve essere effettuata in funzione delle esigenze tecniche ed economiche.

In base al loro obiettivo diagnostico si possono individuare tre grandi gruppi di indagini sui manufatti:

- Indagini per la descrizione delle condizioni generali della costruzione
- Indagini per la caratterizzazione dei materiali
- Indagini per la determinazione del comportamento statico della costruzione

A riassumere brevemente le tecniche e le caratteristiche delle indagini non distruttive si allegano le tabelle seguenti, nelle quali sono riportati schematicamente anche commenti relativi ai limiti delle varie prove e all'esperienza necessaria per una loro corretta esecuzione e interpretazione.

TECNICA	DESCRIZIONE	PRINCIPALI APPLICAZIONI	VANTAGGI	LIMITI	ESPERIENZA NECESSARIA
TERMOGRAFICA	Una speciale apparecchiatura capta l'emissività termica degli oggetti ricostruendo immagini "termiche". La differente capacità di emettere radiazioni I.R. dei vari materiali dipende in gran parte dalla loro natura e densità.	Rilievo di tessiture murarie sotto intonaco. Orditura di solai in legno, ferro o laterocemento. Disomogeneità di materiali diversi). Distribuzione di umidità superficiale nelle murature. Tracciato di impianti idrico-sanitari e termici.	Assolutamente non distruttiva. Di rapida esecuzione con possibilità di registrazione delle immagini.	Apparecchiatura delicata e assai costosa. Non sempre le condizioni al contorno consentono il successo della indagine. Può facilmente trarre in inganno rilevando forme inesistenti ma dovute a diverse emissività locali.	Esecuzione, elaborazione ed interpretazione di tecnici di provata esperienza e preparazione specifica.
MARTINETTO PIATTO SINGOLO	Un martinetto piatto con spessore di 8-10 mm viene inserito in una tasca praticata con un taglio orizzontale in un corso di malta. La misura del carico applicato al martinetto per il recupero delle deformazioni causate dal taglio indica la tensione verticale che insiste in quel punto.	Misura delle tensioni nelle murature verticali e nelle volte in mattoni.	Di rapida esecuzione. Arreca un minimo disturbo alle murature. Risultati di grande attendibilità.	Non può essere applicata su murature coperte da un intonaco di pregio. Non può essere effettuata in murature che non abbiano un orditura regolare.	Grande esperienza sia nell'eseguire la prova in cantiere che nell'effettuare l'interpretazione dei dati.
MARTINETTI PIATTI DOPPI	Viene isolata una porzione di muratura con due tasche parallele entro cui vengono inseriti due martinetti piatti. La misura delle deformazioni della porzione di muratura in funzione del carico applicato, permette di ottenere il valore del modulo elastico della stessa.	Valutazione del modulo elastico di murature in mattoni e malta.	Poco invasiva. Non compromette la muratura in cui la prova viene eseguita. Buona attendibilità, superiore ai metodi che prevedono l'asportazione di campioni e prove in laboratorio.	Gli stessi della prova precedente.	Grande esperienza in cantiere e nel calcolo. Importante avere un Software adeguato che preveda tutte le combinazioni possibili della geometria degli elementi al contorno ed il loro modulo elastico.
ANALISI VIBRAZIONALE (TENSIONE DELLE CATENE)	Viene effettuata l'analisi delle vibrazioni libere di catene metalliche eccitate (pizzicate) verticalmente ed orizzontalmente	Misura del valore di tiro presente nelle catene al fine di valutare la loro efficacia strutturale nei confronti di spinte prodotte da archi e volte.	Prova assai rapida e completamente non distruttiva.	Si può effettuare solo su catene libere. E'importante valutare correttamente il funzionamento dei vincoli.	Bassa esperienza in cantiere. Buona esperienza per l'elaborazione che deve essere fatta con un Software dedicato.
SCLEROMETRICA	Una molla di forza conosciuta provoca l'urto di un'astina in acciaio su una superficie di calcestruzzo. L'altezza del rimbalzo viene misurata (indice di rimbalzo) e riportata su curve sperimentali.	Valutazione della resistenza alla compressione del calcestruzzo.	Economica, di rapida esecuzione ed assai diffusa (grandissima quantità di dati a disposizione).	I risultati sono condizionati dallo stato del calcestruzzo superficiale. Deve essere integrata con altre prove, ad esempio ultrasuoni.	Bassa.

continuità, del grado di vincolo, mentre il contrario avviene quando le azioni sono di tipo indiretto.

Ciò è tanto più vero quanto più il legame costitutivo del materiale è caratterizzato da una elevata capacità di adattamento plastico.

Sono conservativi, ad esempio, gli schemi semplificati in genere adottati per rappresentare le strutture spingenti quali volte e cupole.

Tali modelli trascurando alcune risorse strutturali, si limitano a dimostrare comunque l'esistenza di un regime di sforzi sufficiente ad equilibrare i carichi.

Nel caso delle volte il metodo di modellazione detto il "metodo delle fette" asserisce che la volta, superficie cilindrica avente come direttrice un arco, è certamente in equilibrio se ciascuno degli archi che la compone è a sua volta in equilibrio. Così scomponendo la struttura, si trascura la possibile interazione tra gli archi contigui.

Nel caso delle cupole, il metodo di modellazione è quello della membrana di rivoluzione, cioè una struttura che, pur essendo incapace di resistenza flessionale, è in grado di equilibrare i carichi grazie alla combinazione spaziale degli sforzi agenti uniformemente nel suo spessore.

In esse si ha quindi uno stato piano di tensione nel piano tangente alla membrana, in cui il meridiano e il parallelo sono le direzioni principali.

Nell'ambito del modello proposto, lo studio della cupola è staticamente determinato riducendosi alla determinazione degli sforzi di parallelo, mediante le equazioni d'equilibrio e alla verifica della loro compatibilità con il materiale.

Schemi che ipotizzano le fondazioni come vincoli rigidi, in cui si considerano i vincoli dei solai o delle solette sulle travi come appoggi fissi, appartengono invece alla categoria di schemi semplificati che forniscono minore sicurezza.

Quando non è possibile cautelarsi nei confronti delle incertezze che accompagnano la scelta degli schemi, o quando tale scelta si pone troppo ristretta, occorre prendere in conto diversi schemi alternativi, rappresentativi di comportamenti limite, a cui riferire la verifica della sicurezza stessa.

Tale duplice schematizzazione è ricorrente ad esempio nelle capriate in legno, dove, non è realistico pensare le aste come solo mutuamente incastrate oppure semplicemente incernierate in quanto il comportamento reale risulta sicuramente intermedio tra queste due situazioni limite.

In definitiva il metodo agli elementi finiti ha in parte reso superati la maggior parte dei calcoli approssimati, ma la presa di coscienza dei criteri su cui tali metodi sono basati è quanto mai utile sia per poter effettuare agevolmente quei calcoli di massima che avvalorano le scelte progettuali nella loro maturazione, sia per fornire preliminarmente gli ordini di grandezza delle sollecitazioni in gioco e per

controllare a posteriori che le analisi rigorose susseguenti non contengano errori grossolani.

Inoltre, ferma restando la validità di metodi di calcolo che tendono a simulare il comportamento reale delle strutture, spesso le incertezze che si è costretti ad introdurre inerenti alle caratteristiche dei materiali, ai legami costitutivi e alle complesse geometrie, inficiano la validità dei risultati ottenuti.

### 3.2. Analisi lineare

Un'ipotesi di calcolo che correntemente si assume è quella di considerare il materiale con caratteristiche elastico-lineari.

Invece, ad esempio le murature hanno un comportamento meccanico complesso e difficilmente schematizzabile; elastofragile a trazione, esso può essere assimilato ad elastico lineare a compressione solo per valori di carico piuttosto bassi.

Per carichi crescenti invece si ha una progressiva diminuzione della rigidezza fino a rottura.

Per quanto attiene alle caratteristiche plastiche delle murature si deve rilevare infatti che proprio la parte più debole della stessa, ossia il giunto di malta, allorché cede e si deforma per l'eccessivo carico, conferisce alla muratura nel suo complesso la possibilità di un comportamento in qualche misura duttile, nonostante la fragilità dei singoli materiali componenti.

Conseguenza diretta dell'ipotesi di comportamento elastico lineare del materiale e quindi del principio di sovrapposizione degli effetti sono i criteri che ci consentono di studiare la costruzione in due o più fasi successive in modo da evidenziare, mediante l'introduzione di vincoli provvisori in prima fase il comportamento locale di parti limitate e in ultima fase il comportamento globale della costruzione nel suo insieme.

Ci è di grande utilità questo modo di procedere nelle schematizzazioni agli elementi finiti in campo elastico lineare in cui la mesh più "larga" ci consente in prima fase di valutare il comportamento d'insieme ed un'ulteriore mesh più fitta in corrispondenza dei punti singolari di cogliere gli effetti locali.

### 3.3. Analisi non lineare con simulazione del degrado

Mettendo in conto il comportamento non elastico della muratura rilevante dopo il manifestarsi delle prime lesioni si è anche in grado di comparare il quadro fessurativo rilevato in luogo con quello desunto dal calcolo.

Oggetto di un nostro studio è stato il confronto tra analisi lineare e non lineare di un campanile in muratura.

L'opera, di cui di seguito alleghiamo la mesh completa e alcuni risultati dell'analisi non lineare, si presenta come un elemento tendenzialmente snello.

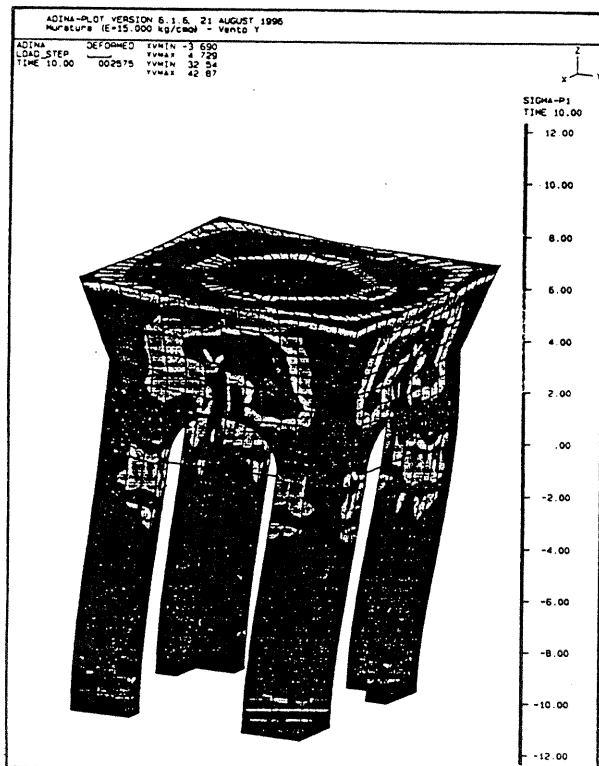
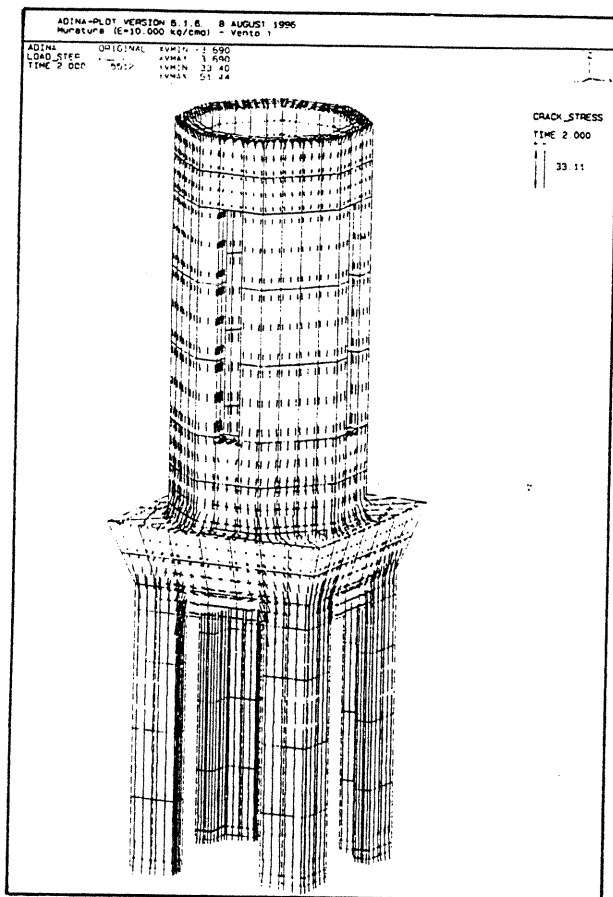


Figure 4/5: Campanile di Zanè: risultati dell'analisi non lineare.

E' stato inoltre svolto uno studio comparativo tra analisi del primo ordine ed analisi in grandi spostamenti di un portale in calcestruzzo armato avente colonne snelle.

Le analisi sono state effettuate, in primo luogo, nell'ipotesi di telaio integro e in seguito ipotizzando le colonne (sezione: 30x30 cm) con sezione di spessore ridotto per un tratto (caso A) o lungo tutta la loro estensione (caso B).

La riduzione di sezione ha inteso simulare la carbonatazione del cls, che può portare all'abbattimento dei valori di resistenza nelle zone interessate da tale fenomeno.

L'analisi ha mostrato come all'aumentare dello spessore carbonatato si incrementi in modo non trascurabile il rapporto tra momento valutato con analisi del primo ordine e quello derivante da una analisi del secondo ordine così come il rapporto tra gli spostamenti.

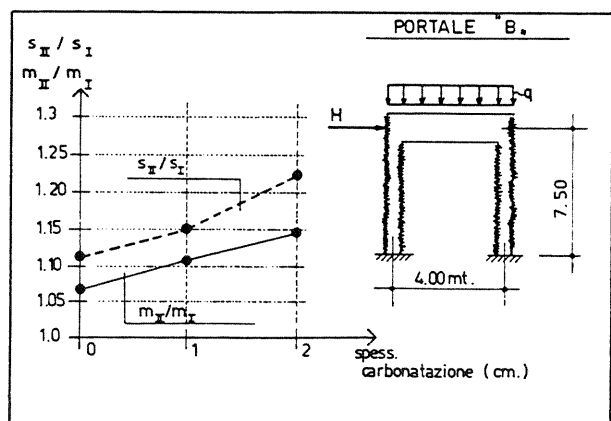
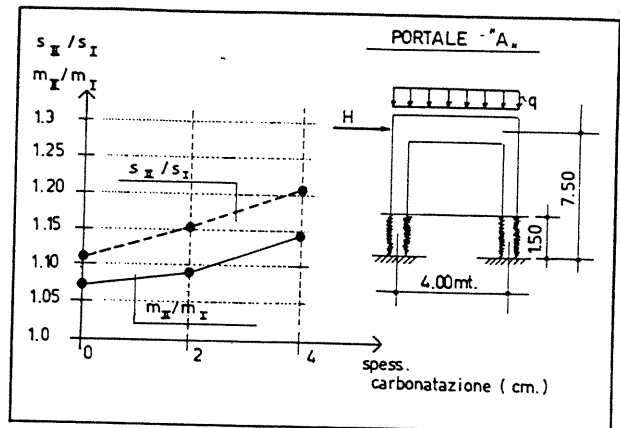


Figure 6/7: Andamento del rapporto tra i momenti del II ordine e quelli del I ordine al piede della colonna e degli spostamenti in sommità in portali aventi colonne soggette a carbonatazione.

FLUSSO LOGICO

TEMA

