

Valutazione del degrado strutturale di edifici in muratura

Professore
LORENZO JURINA
Dipartimento di
Ingegneria Strutturale
Politecnico di Milano

1) Introduzione

Numerosi sono gli agenti o gli eventi che possono diminuire il grado di sicurezza delle componenti strutturali di un edificio in muratura, affiancandosi ad eventuali carenze originarie dovute ad errata concezione strutturale, o tecniche esecutive non idonee o ad uso di materiali scadenti.

Il degrado strutturale (inteso come diminuzione del grado di sicurezza locale e/o globale della struttura) può interessare ciascuno dei tre aspetti fondamentali che concorrono a definire il funzionamento dell'insieme strutturale: *la geometria, il materiale ed i carichi*.

Si riferiscono al primo aspetto (geometria):

coazioni indotte da movimenti del terreno e cedimenti delle fondazioni, variazioni termiche e igrometriche che conducono a cambiamenti di lunghezza e volume, propagazione di lesioni che alterano lo schema statico originario, strapiombi delle pareti, sfaldamento o erosione delle sezioni resistenti.

Si riferiscono al secondo aspetto (materiale):

diminuzione delle resistenze e rigidezza del materiale e perdite di coesione tra i vari costituenti.

Si riferiscono al terzo aspetto (carichi):

sollecitazioni non previste nel progetto originario, eventi sismici, vibrazioni indotte dal traffico pesante, ecc.

Alla varietà degli aspetti del degrado e delle sue cause si aggiunge la diversa gravità delle patologie, così che la valutazione del residuo grado di sicurezza di una struttura esistente risulta sovente problematico.

È conveniente pertanto procedere secondo tre fasi distinte e successive: 1) esame della situazione statica con individuazione o descrizione del degrado; 2) ricerca delle cause perturbatrici; 3) studio dei rimedi.

Con un linguaggio mediato dalla medicina, potremmo definire queste fasi: anamnesi ed esame obiettivo, diagnosi, terapia.

Per evitare di curare soltanto i sintomi del degrado e per costituire un valido e duraturo supporto strutturale alle operazioni complementari di micro-conservazione, la diagnosi statica delle strutture e la definizione del reale grado di sicurezza dell'edificio deve precedere e motivare la scelta degli interventi.

Il rispetto storico del già costruito ed una oggettiva analisi di costi, basati sulla conoscenza dello «status quo», concorreranno a definire gli interventi minimi necessari per ripristinare le caratteristiche strutturali originarie o, eventualmente, per migliorarne l'efficienza statica in vista di nuove condizioni di carico o mutate situazioni ambientali.

In questa memoria ci soffermiamo soltanto sulle prime due fasi, di carattere acquisitivo e diagnostico, legate alla valutazione del degrado, senza entrare negli aspetti più propositivi e progettuali della terapia.

Come traccia ed esemplificazione si farà costante riferimento alle operazioni di indagine, controllo ed interpretazione del degrado strutturale di un pregevole edificio in muratura del XIII secolo, il Palazzo della Regione di Milano (Fig. 1), il cui restauro è stato affidato dal Comune di Milano al prof. M. Dezzi Bardeschi e ad un gruppo di collaboratori, tra cui lo scrivente per la parte strutturale [1].

2) La fase di anamnesi

Un aiuto sostanziale per la valutazione della situazione statica di un edificio è un'accurata ricostruzione delle sue vicissitudini storiche.

Fig. 1



Il ritrovamento della documentazione di progetto (quando disponibile), l'acquisizione di notizie relative all'esecuzione e ogni altra informazione su eventi occorsi durante la costruzione e la vita dell'edificio sono di estrema utilità per suffragare o per scartare ipotesi sull'origine di dissesti altrimenti inspiegabili.

La ricerca storica va accompagnata dalla raccolta dei dati sui metodi costruttivi e le tecniche in uso all'epoca della costruzione, o all'epoca di eventuali aggiunte o sottrazioni.

Nel caso del Palazzo della Regione tale ricerca ha riguardato non solo il singolo edificio, ma l'intero antico Broletto di Milano, e la cronologia risultante ha raccolto sia gli interventi e le modifiche realizzate alle diverse epoche, sia gli usi e le destinazioni in rapporto alla società e alle istituzioni.

Le ricerche d'archivio non sempre forniscono prove definitive, ma spesso solo indizi, da verificare nell'esame obiettivo della struttura.

Nell'esempio in oggetto mentre era ben documentata l'esecuzione del sopralzo eseguito nel 1771 sulla originaria struttura del 1228, contraddittorie erano le informazioni relative alla sostituzione del pavimento in legno con le attuali volte in muratura.

La prova definitiva è stata fornita soltanto da una analisi di termoluminescenza che ha datato le voltine al XVIII secolo, lo stesso periodo in cui è stato eseguito il sopralzo [2].

Volume e pavimenti sarebbero stati modificati in quel periodo per ospitare l'Archivio Notarile.

Utili informazioni sono state tratte anche dai computi metrici e dai consuntivi di spesa, tramandatici dagli archivi cittadini, in cui ricorrono notizie di frequenti interventi alle capriate, degradate agli appoggi a causa dell'umidità. Per lunghi periodi queste capriate hanno funzionato a spinta non eliminata, appoggiando-

si alle pareti perimetrali e inducendo forti strapiombi.

Tranne rari casi comunque, l'acquisizione di dati storici specifici risulta difficile e spesso è l'esame obiettivo che deve fornire la maggior parte delle informazioni.

3) Le fasi dell'esame obiettivo

Al fine di definire compiutamente lo stato di fatto dell'edificio è necessario indagare sia gli *aspetti geometrici e cinematici* (dimensioni e movimenti relativi delle varie parti), sia gli *aspetti costitutivi* (natura e proprietà dei materiali) sia, ancora, gli *aspetti statici* (natura ed entità dei carichi). Esamineremo in dettaglio tali diversi aspetti.

3.1) La geometria

Supporto indispensabile per le operazioni di diagnosi è un accurato rilievo geometrico della struttura dove, accanto alle dimensioni e agli spessori delle pareti, è necessario rilevare gli strapiombi alle varie quote dell'edificio, le lesioni passanti, i segni lasciati dai successivi usi o interventi ed, infine, lo stato di conservazione o di degrado locale dei singoli componenti.

È conveniente inoltre che il rilievo metrico sia corredato da una campagna fotografica che consenta di stendere una mappa più dettagliata delle fessurazioni e del degrado, oltre a permettere il raffronto con precedenti analoghi documenti eventualmente esistenti.

All'interno del rilievo geometrico, il rilievo degli strapiombi e quello delle lesioni forniscono le prime valide indicazioni per la successiva fase di diagnosi, anche se la natura composita e fragile del «materiale muratura» ed il fatto di analizzare strutture dal comportamento prevalentemente bidimensionale, complica la definizione del legame causa-effetto.

A titolo di esempio, si riportano in Tab. I gli strapiombi rilevati a diverse altezze del Palazzo della Regione.

Quote m	Piazza Mercanti					Via Mercanti					Palazzo Poggioreale					Piazza Duomo		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
21,00	-3	0	3,3	3	0,5	0,5	0,5	1	3,5	5	7	0	3,5	6,5	6	3		
15,30	-1	3,5	0,5	0,5	0,5	1	3,5	5,5	3,8	3	0,5	0	5,3	0	0	3,5		
14,70	-2,5	13,5	13,7	11,8	3,3	7	11,5	12	12,8	-0,5	6	7,5	6,5	5,1	6,1	3,6		
7,90	-1	6	7	8,5	3,5	1	7,5	1,5	0	-1	7,7	0,5	6	5,5	5,5	3,5		
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		



Tabella I - Valori degli strapiombi alle varie quote con pianta di riferimento.

Come si osserva le murature delle facciate più lunghe presentano spaccamenti notevoli verso l'esterno, con valori massimi di 13,7 e di 12,5 cm, sulle facciate verso Piazza Mercanti e verso Via Mercanti rispettivamente, a quota 14,70 cm.

La parete corta verso Piazza Duomo mostra invece di aver subito una rotazione verso l'esterno e una traslazione del proprio piano verso Piazza Mercanti, mentre la facciata corta simmetrica ha subito spostamenti in direzione opposta. Analizzando le misure nel loro complesso si può evidenziare un movimento di rotazione globale in senso orario dell'intero edificio.

Mentre nelle murature duecentesche gli strapiombi in generale aumentano salendo verso l'alto fino a raggiungere un massimo a quota 14,70 m., nel sopralzo la tendenza si inverte e si passa da un valore di 6,5 cm. a quota 15,30 m. e 3,6 cm. a quota 21,00 m.

Sembra possibile concludere che gli strapiombi a quota 14,70 m. siano preesistenti al 1771 e che siano stati provocati all'origine dalla spinta delle capriate degradate (e quindi spingenti) e amplificate, in seguito, dalla rotazione delle fondazioni poggianti su terreno cedevole.

Per quanto riguarda le pareti del sopralzo il loro baricentro è stato impostato in arretrato rispetto a quelle sottostanti e, allo scopo di mascherare almeno in parte gli strapiombi, è stata loro assegnata una contropendenza verso l'interno.

Si riserva che la presenza di strapiombi conduca ad una eccentricità non trascurabile nella risultante dei carichi dovuti al peso proprio, da considerare in fase di verifica di sicurezza.

A riscontro dei dati ottenuti sulle pareti sono state misurate anche le quote delle chiavi delle volte e degli archi della loggia; i punti di massimo cedimento si riscontrano lungo la diagonale che procede dall'angolo Sud all'angolo Nord dell'edificio.

Ciò lascia supporre la presenza di una fascia di terreno più deformabile proprio in questa zona, causa dei maggiori cedimenti delle fondazioni e dei conseguenti strapiombi sulle pareti. Sull'argomento si ritornerà più avanti.

Accanto al rilievo degli strapiombi, il rilievo delle lesioni spesso fornisce gli elementi più illuminanti per la diagnosi.

La muratura è un materiale fragile che resiste bene a compressione ed è caratterizzato da una rottura improvvisa al raggiungimento di uno stato limite di dilatazione.

Nota lo stato di sollecitazione pluriassiale sul materiale è possibile individuare le tensioni principali e le relative direzioni prevedendo quindi le modalità di rottura puntuali.

Più difficile si presenta il problema inverso, vale a dire quello di determinare il quadro di tensioni che ha causato la fessura.

Ci limiteremo ad illustrare a titolo di esempio solo una delle lesioni più frequenti negli edifici in muratura, quelle legate al cedimento differenziale delle fondazioni.

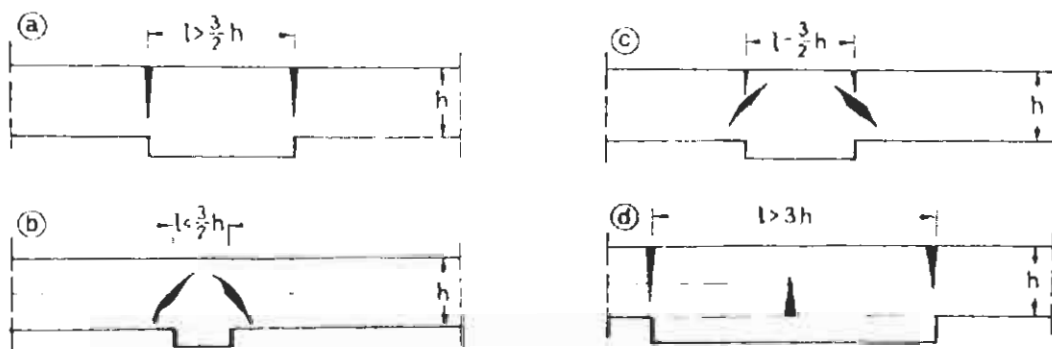
Consideriamo una parete muraria portante di altezza h sottoposta ad un cedimento della base di appoggio per un tratto di lunghezza l .

A seconda del rapporto (h/l) tra l'altezza della parete e l'estensione del tratto interessato dal cedimento può prevalere l'effetto flessionale (caratterizzato da lesioni verticali) o l'effetto tagliante (caratterizzato da lesioni più o meno inclinate).

In Fig. 2 tratta da [3] si illustrano le lesioni risultanti quando il fenomeno di cedimento interessa la zona centrale o la zona di estremità della parete.

Più difficilmente riconoscibili sono le lesioni indotte da cedimenti trasversali alla parete o da rotazioni imposte, che tuttavia sono meno frequenti.

Fig. 2a

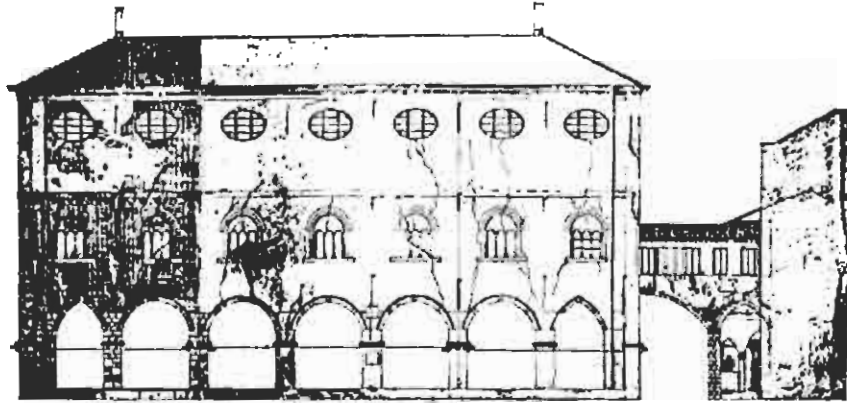


Un esempio notevole di quadro fessurativo legato ai cedimenti è quello del Palazzo della Regione, illustrato in Fig. 3, dove è interessante notare che le lesioni più rilevanti si riscontrano agli estremi delle facciate principali in corrispondenza delle penultime trifore. Tali zone rappresentano punti di discontinuità nelle rigidità della struttura in quanto sono presenti sia pilastri di facciata di sezione maggiore che altrove, sia archi trasversali di collegamento più massicci.

Benché la causa generale delle lesioni sia evidentemente legata ai cedimenti, non facilmente interpretabile ne risulta l'entità ed i conseguenti movimenti relativi tra le varie parti della struttura separata dalle fessure.

Per individuare in modo quantitativo i cedimenti degli appoggi si è fatto ricorso ad un metodo apparentemente nuovo di indagare, basato su tecniche di «identificazione indiretta» [4,5] già note in altri campi. Si è proceduto, a tale scopo, ad elaborare un modello numerico ad elementi finiti delle pareti dell'edificio come illustrato dal fotomontaggio di Fig. 4 (cortesia dell'ISMES di Bergamo) e più in dettaglio nelle Figg. 5 a) b) relative alle pareti longitudinali e trasversali.

Fig. 3



L'elevato numero di elementi finiti adottato (oltre 1300 e 750 elementi finiti piani isoparametrici del secondo ordine rispettivamente per i due reticoli) è derivato dall'esigenza di tenere conto contemporaneamente di zone di diverso materiale e spessore, della posizione delle lesioni passanti e della possibilità di simulare l'introduzione di tiranti di rinforzo.

In prima approssimazione le analisi sono state condotte in campo elastico dove il materiale «muratura» è stato simulato come un continuo equivalente ortotropo. La presenza delle lesioni esistenti è opportunamente considerata nel reticolo adottato mediante sconnessura degli elementi finiti i cui nodi si trovano lungo linee sedi di fessure passanti.

Poiché il modello si propone di ricostruire soltanto la situazione attuale con-

Fig. 4

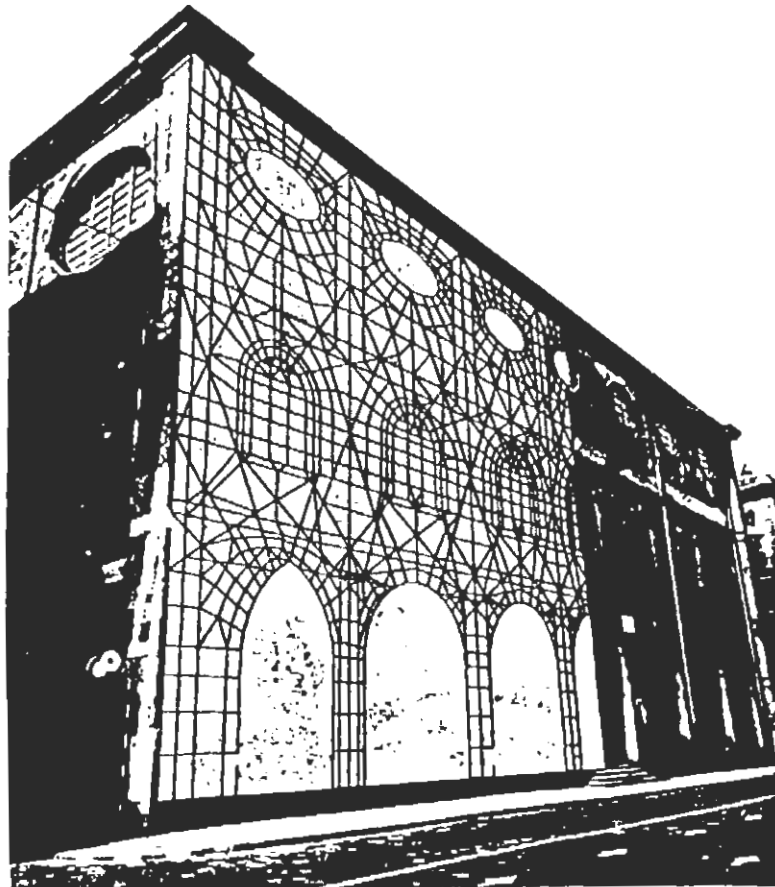


Fig. 5a

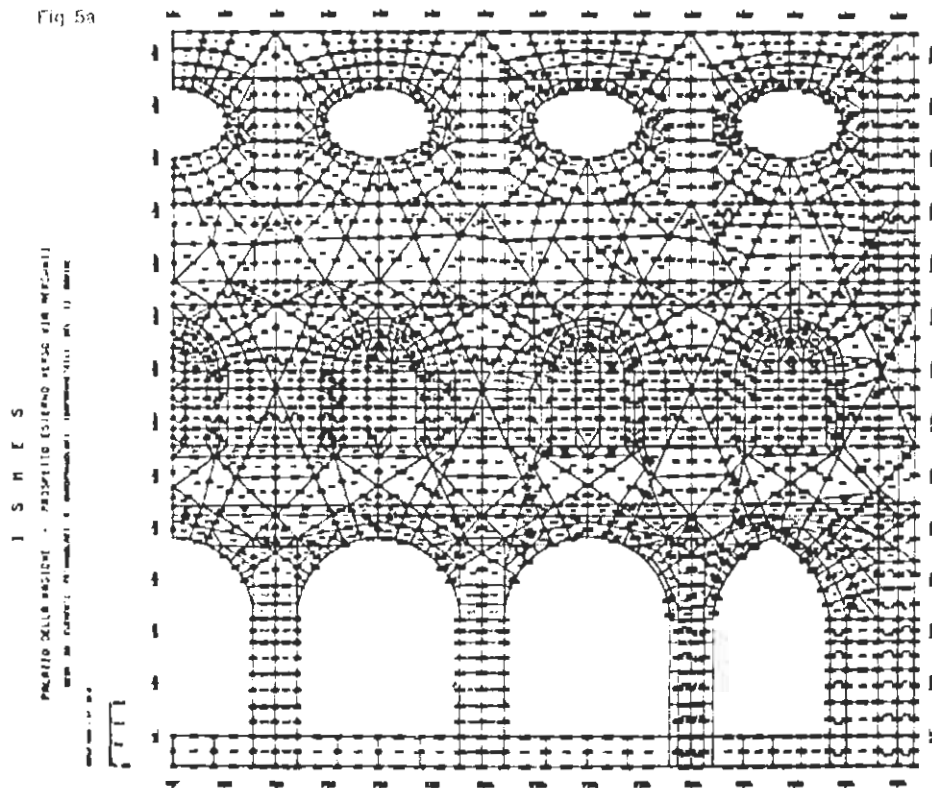
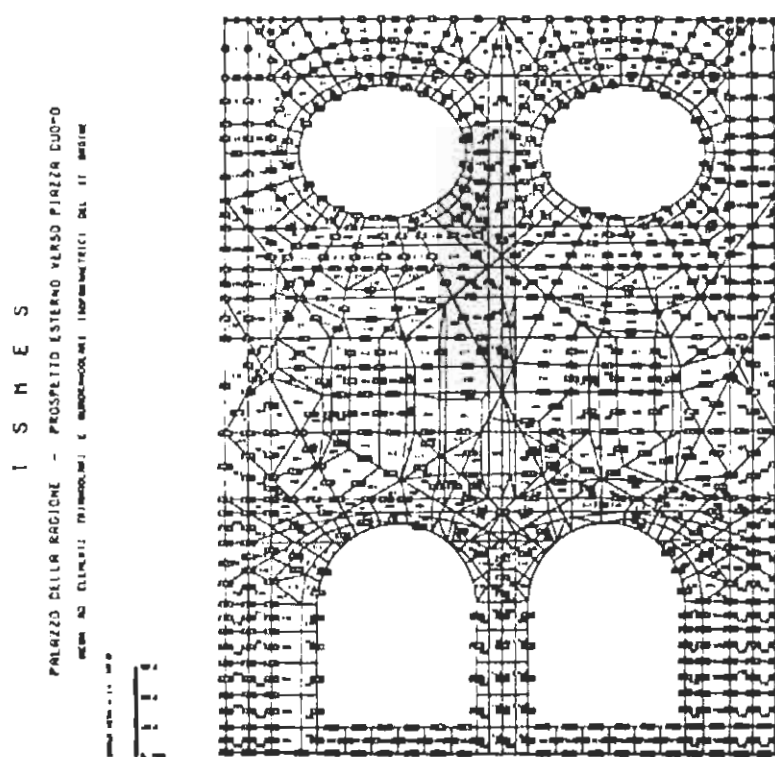


Fig. 5b



seguito i carichi e i cedimenti vincolari, la procedura adottata (che concentra le non linearità di comportamento in zone conosciute e preassegnate, mentre considera una risposta lineare nelle restanti zone), pare sufficientemente adeguata.

L'indagine si propone di determinare la più attendibile combinazione di cedimenti dei pilastri che, sommata all'effetto dei carichi permanenti, giustifichi la formazione dell'attuale quadro di fessurazioni e consenta quindi di ottenere una verosimile valutazione dello stato di deformazione e di sforzo presente sulla struttura.

Mediante il modello numerico si sono imposti pertanto separatamente cedimenti e rotazioni unitarie ai vari pilastri di appoggio [6].

Gli spostamenti relativi tra i lembi delle fessure si possono esprimere come combinazioni di quelli ottenuti nelle singole analisi realizzate, e risultano funzioni lineari dei cedimenti incogniti dei vari pilastri.

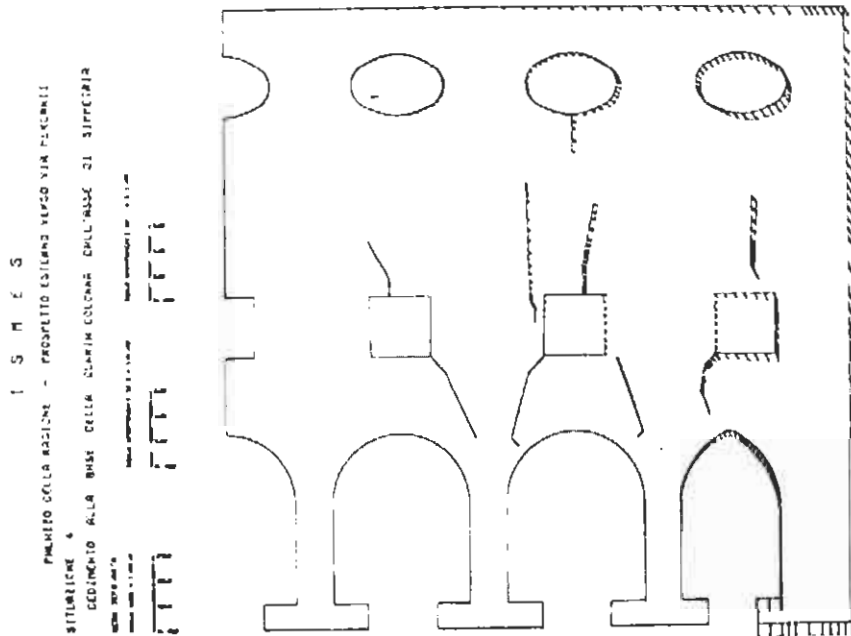
Lo spostamento relativo $S_j(x, y)$ valutato nel punto $P(x, y)$ secondo la direzione j , può cioè esprimersi mediante una relazione lineare del tipo:

$$S_j(x, y) = S_j^p(x, y) + \sum_{h=1}^n \delta_h \cdot S_j^u(x, y) \tag{1}$$

dove:

- $S_j^p(x, y)$ è lo spostamento relativo causato nel punto $P(x, y)$, in direzione j , da un cedimento unitario del pilastro h ;
- $S_j^u(x, y)$ è l'analogo spostamento causato dai carichi permanenti applicati;
- δ_h è il cedimento incognito del pilastro h ;
- n è il numero dei pilastri di base.

Fig. 6



Si tratta quindi di individuare il valore dei cedimenti incogniti δ , in grado di fornire spostamenti relativi il più possibile vicini a quelli effettivamente misurati sulle pareti del Palazzo, che vengono indicati con il simbolo $S_j(x, y)$ e sono in numero di m . Definita la funzione errore:

$$c(\delta) = \sum_{i=1}^m (S_j(x, y) - S_j^p(x, y))^2 \tag{2}$$

in cui $S_j(x, y)$ è funzione lineare di δ (vettore dei cedimenti), un procedimento di minimizzazione basato sul metodo dei minimi quadrati, consente di individuare i valori δ_h dei cedimenti dei pilastri.

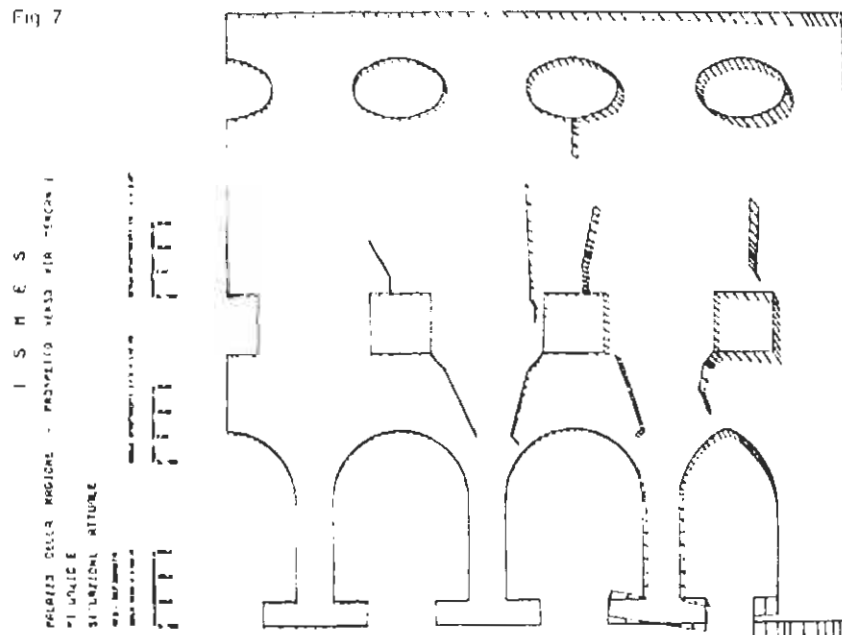
Nella Fig. 6 sono riportati gli spostamenti dei punti di contorno dovuti ai vari cedimenti unitari imposti. I cedimenti finali più verosimili, ottenuti tramite il pro-

cedimento di identificazione, sono riportati nella Tab. II e sintetizzati in Fig. 7.

Come si osserva, il quadro fessurativo è legato ad un cedimento pronunciato dei due pilastri di estremità accompagnato da una rotazione del pilastro d'angolo incapace di assorbire i carichi esercitati dagli archi vicini la cui spinta non è eliminata per mezzo di catene.

Certamente più complessa risulta la lettura e l'interpretazione delle lesioni sulle facciate trasversali, in quanto più delle altre sono state manomesse con successive aperture. Le lesioni, prevalentemente verticali, seguono le linee di contorno dei risarcimenti murari eseguiti nelle varie epoche e, con ogni probabilità, sono legate allo spanciamento delle facciate longitudinali che provoca in queste pareti più corte uno stato di diffusa trazione orizzontale.

Fig. 7



L'analisi numerica sopra descritta è stata ripetuta anche per la parete trasversale e i risultati sono illustrati in Fig. 8 e Fig. 9.

A riprova della validità del metodo proposto, pur operando in modo indipendente per la parete longitudinale e per quella trasversale, si è ottenuto un valore del cedimento del pilastro d'angolo comune ad entrambe praticamente uguale.

3.2) I materiali

La definizione delle caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati negli edifici oggetto di indagine è, anch'essa, supporto fondamentale nella diagnosi.

L'esame visivo costituisce la prima guida alla scelta dei luoghi in cui realizzare controlli distruttivi e non distruttivi.

Anomalie nell'aspetto, calore, suono e tatto costituiscono spesso sintomi significativi.

È possibile, mediante il confronto tra campioni situati in zone degradate o non degradate, stabilire quantitativamente l'entità del degrado e, talora, il suo decorso nel tempo.

Attacco clinico, umidità, vibrazioni e varie altre cause interessano e modificano il micro-comportamento dei materiali costituenti la muratura.

Da un punto di vista strettamente strutturale tuttavia ha scarso interesse il comportamento puntuale e la muratura può essere considerata come un insieme omogeneo (in grande scala) di cui interessano le caratteristiche medie di comportamento, allo stato attuale.

In taluni casi la caratterizzazione del materiale può essere ottenuta con prove distruttive ottenute in laboratorio su campioni prelevati dalla muratura. Il pro-

Fig. 8

I S M E S
PALAZZO DELLA REGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO PIAZZA DUOMO
SITUAZIONE 2
CEDIMENTO ALLA BASE DELLA COLONNA D'ANGOLO DI SINISTRA
PUNTO DEL PIANO: 1/100
PUNTO DEL PIANO: 1/100
PUNTO DEL PIANO: 1/100
PUNTO DEL PIANO: 1/100

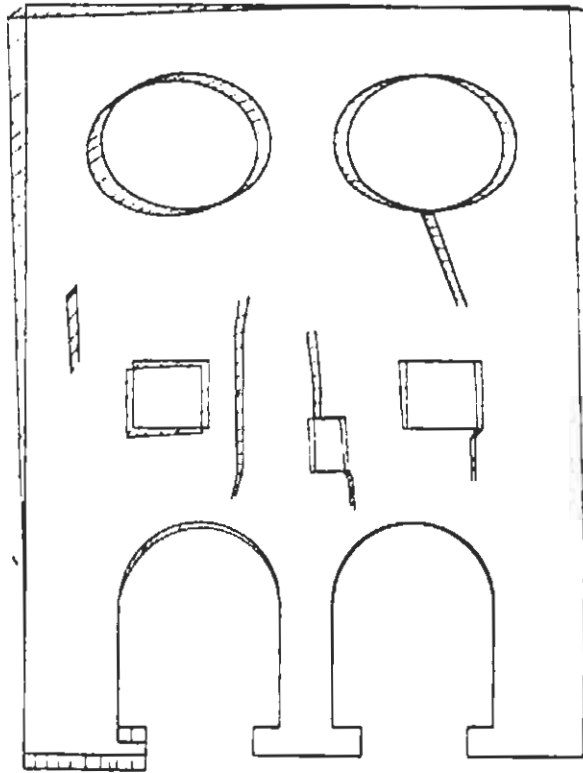
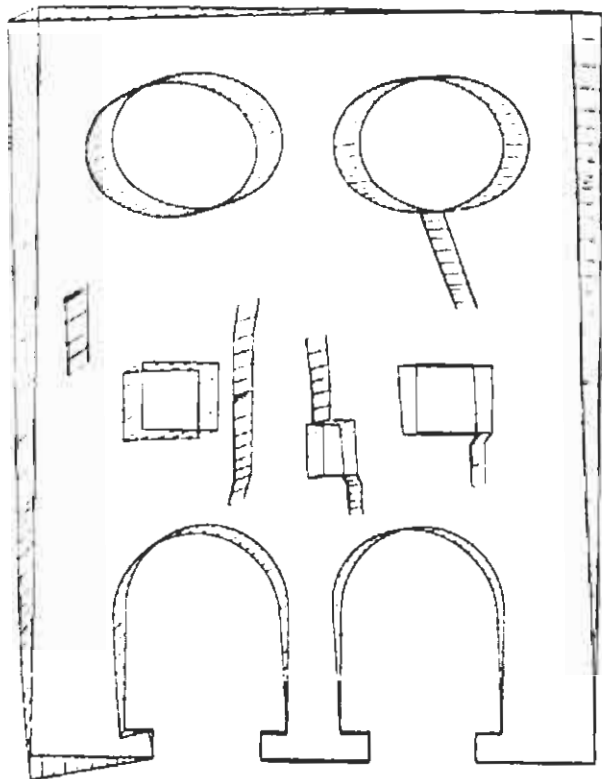


Fig. 9

I S M E S
PALAZZO DELLA REGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO PIAZZA DUOMO
SITUAZIONE 1
SITUAZIONE ATTUALE
PUNTO DEL PIANO: 1/100
PUNTO DEL PIANO: 1/100
PUNTO DEL PIANO: 1/100
PUNTO DEL PIANO: 1/100



blema più gravoso da risolvere in tal caso è naturalmente quello del trasporto, che non deve modificare seriamente le condizioni rispetto a quelle in-situ. In Fig. 10 si riportano alcune delle prove più frequentemente adottate [7].

La necessità di rispettare gli edifici monumentali tuttavia comporta spesso la pratica impossibilità di estrarre campioni e richiede l'adozione di prove non distruttive. Benché molte tecniche indirette di prova in-situ siano state messe a punto negli ultimi anni (ultrasuoni, percussione, ecc.), la caratterizzazione meccanica del materiale mediante applicazione diretta di carichi noti presenta indubbi vantaggi soprattutto se condotta su campioni di dimensioni rilevanti.

Proprio durante la campagna di indagini sul Palazzo della Regione è stata messa a punto, in collaborazione con l'ISMES di Bergamo, una procedura originale di prova statica in-situ praticamente non distruttiva [8,9].

La prova, in cui si utilizzano martinetti piatti inseriti nei giunti di malta, si articola in due fasi distinte:

- 1) determinazione dello stato di sollecitazione nella muratura;
- 2) determinazione delle caratteristiche di deformabilità e resistenza limite.

Nella *prima fase* si esegue un taglio orizzontale nella parete asportando uno strato di malta.

La redistribuzione di sforzi che si instaura nella muratura causa una parziale chiusura del taglio, che viene misurata (Fig. 11).

All'interno del taglio viene inserito poi uno speciale martinetto piatto (Fig. 12). Mediante una pompa idraulica la pressione viene aumentata al suo interno fino ad ottenere un annullamento della convergenza precedentemente misurata.

In questo modo è possibile ottenere una indicazione della sollecitazione verticale media presente nella muratura.

Nella *seconda fase* della prova si inserisce un secondo martinetto piatto, 50 cm. circa al di sotto del primo, delimitando così una porzione di muratura di dimensioni apprezzabili, soggetta ad uno stato di sollecitazione prevalente verticale.

Fig. 10

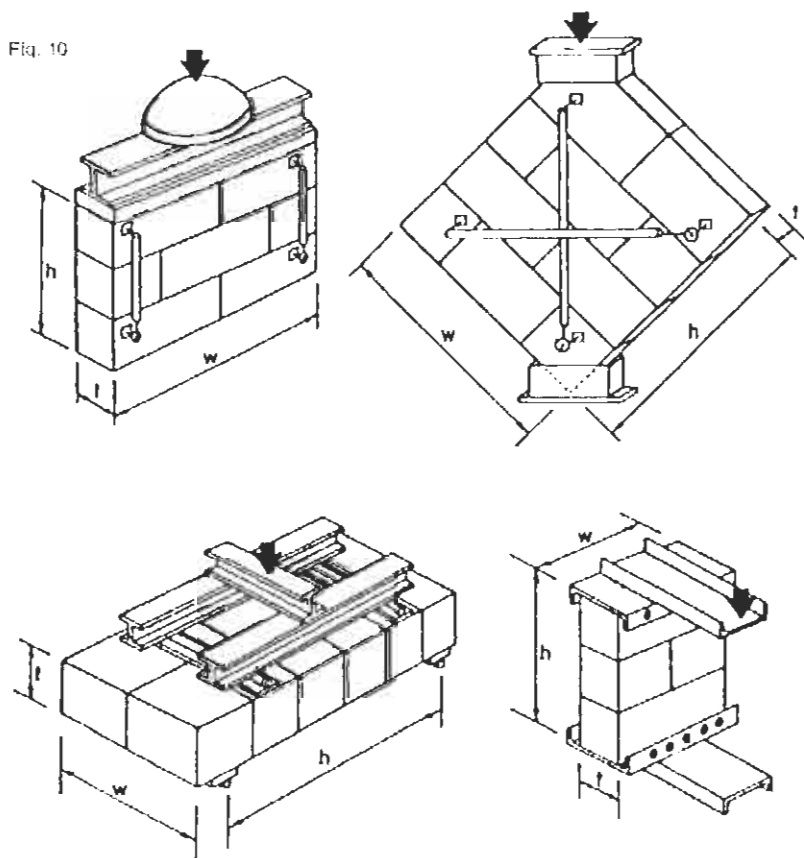
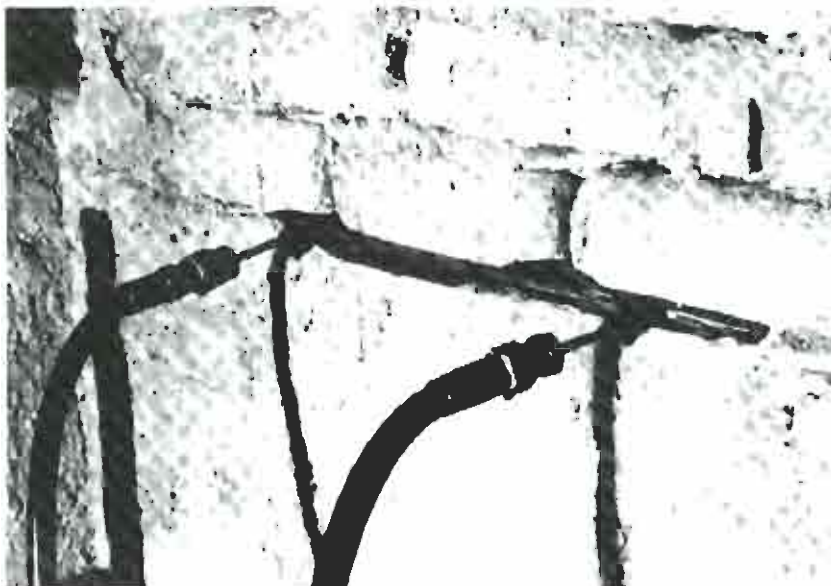


Fig. 11



Fig. 12



Mediante i martinetti collegati alla medesima pompa, si sottopone la muratura a diversi cicli di carico e scarico. A livelli prefissati di carico vengono rilevati gli spostamenti relativi tra vari punti della parete, mediante estensimetri meccanici rimovibili (Fig. 13). Queste misure consentono di ottenere una indicazione completa del campo di deformazione sulla faccia libera del campione esaminato.

Fig. 13



L'interpretazione dei risultati sperimentali è resa complessa dal fatto che il campione presenta solo tre facce libere (su una delle quali si effettuano le misure) mentre le restanti tre sono solidali alla muratura circostante.

A tale scopo è stato predisposto un modello numerico ad elementi finiti tridimensionali che riproduce la zona di muratura soggetta alla prova. Con l'ausilio di tale modello vengono realizzate diverse analisi del campo di sforzo e deformazione al variare della rigidità del materiale.

I valori più probabili dei parametri di rigidità del materiale sono quelli per cui diventa minimo lo scarto tra le *misure vere* di spostamento (misure sperimentali) e quelle ottenute nell'analisi numerica (misure calcolate) funzioni della rigidità introdotta nel modello.

Il legame costitutivo assunto per l'interpretazione delle prove è quello di un continuo elastico equivalente ortotropo, ipotesi che rappresenta un buon compromesso tra realismo e semplicità.

Un tale materiale è caratterizzato in generale da 9 parametri incogniti da identificare, un numero troppo elevato rispetto alle informazioni sperimentali disponibili.

La muratura tuttavia è un caso speciale di materiale ortotropo, caratterizzato dall'alternanza, a intervalli costanti, di due materiali praticamente omogenei ed isotropi (la malta e i mattoni).

È stato mostrato in [9] che i 9 parametri di rigidità per un tale materiale si possono esprimere, in modo approssimato, sulla base di altri 9 parametri, vale a dire:

- i tre rapporti tra lo spessore della malta e quello del mattone nelle tre direzioni di ortotropia (t/a_x , t/a_y , t/a_z);
- i due moduli di Young della malta e del mattone (E_m , E_b);

— i due coefficienti di Poisson di taglio della malta e del mattone (ν_m, ν_r).

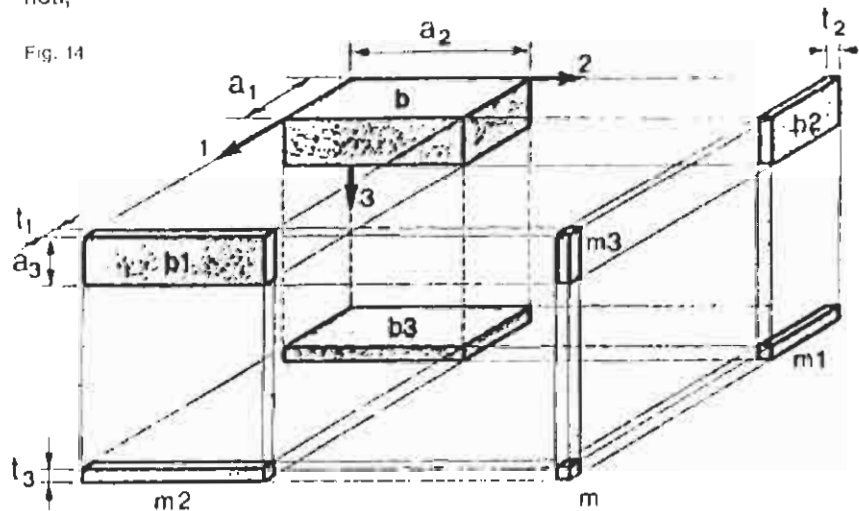
In Fig. 14 si illustra l'elemento modulare di muratura utilizzato per formulare l'equivalente dei parametri.

Tale equivalenza si è ottenuta imponendo il rispetto dell'equilibrio e della congruenza tra gli otto blocchetti (1 mattone e 7 prismi di malta) che compongono l'elemento modulare.

Queste osservazioni riducono sostanzialmente il numero di parametri significativi da identificare in quanto:

— i rapporti tra gli spessori, per una data muratura, sono misurabili e quindi noti;

Fig. 14



— I moduli di taglio (G) sono variabili dipendenti da E e ν , nell'ipotesi di isotropia dei costituenti;

— i coefficienti di Poisson, per valori compresi tra 0,15 e 0,35, non modificano sostanzialmente la risposta e quindi possono essere assegnati a priori.

I parametri fondamentali da determinare si riducono pertanto a solo due: i moduli di Young della malta e del mattone (E_m, E_r).

Un confronto condotto per tentativi richiederebbe però ancora un numero troppo elevato di analisi. In [9] si è utilizzata una procedura di identificazione dei valori ottimali di E_m ed E_r molto rapida.

Gli spostamenti ottenuti mediante il modello numerico infatti sono funzioni lineari di E_m ed E_r (per un rapporto $E_m/E_r = \text{costante}$) e quindi, calcolati gli spostamenti u , per una particolare coppia di parametri (E_m, E_r), gli spostamenti corrispondenti ai parametri ($\alpha E_m, \alpha E_r$) (con α moltiplicatore arbitrario) si ottengono dividendo per α gli spostamenti u calcolati in precedenza.

Per un assegnato rapporto E_m/E_r , il valore di α che rende minimo lo scarto tra gli spostamenti calcolati e quelli misurati, può essere ottenuto in modo molto semplice e, ripetendo l'analisi per diversi valori del rapporto E_m/E_r , si ottiene un luogo di punti di minimo locale. Tale luogo è caratterizzato da valori pressoché analoghi della funzione errore. È necessario pertanto ripetere il procedimento utilizzando insiemi diversi di dati sperimentali.

In Fig. 15 si mostra la procedura grafica utilizzata per la ricerca del minimo assoluto della funzione errore partendo da dati rilevati su una parete del Palazzo della Regione.

La linea A rappresenta il luogo dei punti di minimo ottenuti a partire dalle sole misure di spostamento verticale; la linea B invece quello ottenuto da misure di spostamento orizzontali.

Il punto di intersezione rappresenta la coppia cercata dei moduli elastici E_m ed E_r .

Attraverso questa informazione ed il procedimento analitico di equivalenza sopra accennato è possibile poi risalire alla definizione dei 9 parametri che descrivono la matrice di rigidezza equivalente alla muratura.

Benché la prova non sia di interpretazione immediata i suoi vantaggi sono evidenti.

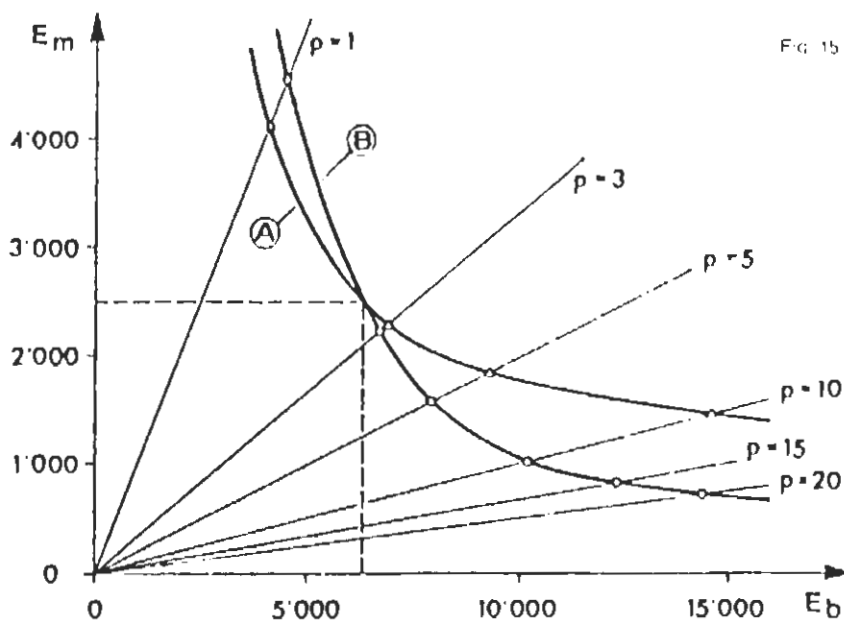


Fig. 15

— Il campione di muratura sul quale vengono determinate in-situ le caratteristiche di deformabilità è praticamente indisturbato e possiede dimensioni tali da garantirne la rappresentatività.

— Il ripristino delle condizioni originarie risulta semplice in quanto gli strati di malta asportati (unico disturbo arrecato alla muratura) possono essere reintegrati facilmente, se necessario con materiale espansivo.

— Il costo della prova è contenuto e i risultati delle analisi numeriche vanno ottenuti una sola volta e poi memorizzati per gli ulteriori confronti.

— I martinetti, lasciati nella loro sede dopo la prova, possono funzionare da celle di carico per evidenziare eventuali sovraccarichi indotti nelle pareti dagli interventi di restauro o da altre cause accidentali.

Nella seconda fase della prova inoltre i carichi possono essere aumentati fino ad ottenere una graduale uscita dal campo elastico. Questo consente di ottenere, per estrapolazione, una informazione sul valore del carico limite di rottura della muratura.

La validità dei risultati ottenuti dal processo di identificazione numerica dipende da due fattori principali: in primo luogo la capacità del modello adottato di descrivere compiutamente il sistema reale, in secondo luogo l'entità degli errori di misura.

Per il primo punto osserviamo che il legame costitutivo usato per l'identificazione deve essere *uguale* a quello che si intende adottare nel modello globale dell'intera struttura, e che quindi va scelto sulla base di un compromesso tra semplicità e completezza.

Per il secondo punto osserviamo che è opportuno valutare l'influenza degli errori di misura in modo da stimare la dispersione dei risultati ottenuti. Tra i molti lavori generali sull'argomento, è stato descritto in [10] un procedimento specifico che, perturbando le misure sperimentali a disposizione con l'aggiunta di una distribuzione casuale di errori, consente di individuare la deviazione standard dei risultati ottenuti.

Il confronto tra le varie prove effettuate sul Palazzo della Regione mediante la tecnica descritta ha consentito di rilevare che le caratteristiche di deformabilità e di resistenza della parte inferiore (XIII secolo) sono mediamente superiori a quelle del successivo sopralzo (XVIII secolo).

Altri metodi non distruttivi si stanno sperimentando recentemente sulle murature. Essi si basano usualmente sulla generazione e propagazione di onde nel materiale e sullo studio dei fenomeni di risonanza, rifrazione e riflessione.

Tali metodi, nati per lo studio di materiali a composizione tipicamente omogenea e isotropa si stanno rivelando molto utili anche nel campo della muratura

[11] e sono attualmente oggetto di vasta sperimentazione.

Prima di concludere questi brevi cenni sulla caratterizzazione dei materiali, osserviamo che una tendenza purtroppo abituale nell'acquisizione di dati per valutare il degrado di un edificio, è quella di fermarsi allo studio della parte emergente dal terreno.

Lo studio delle fondazioni e lo studio del terreno di supporto spesso vengono trascurate.

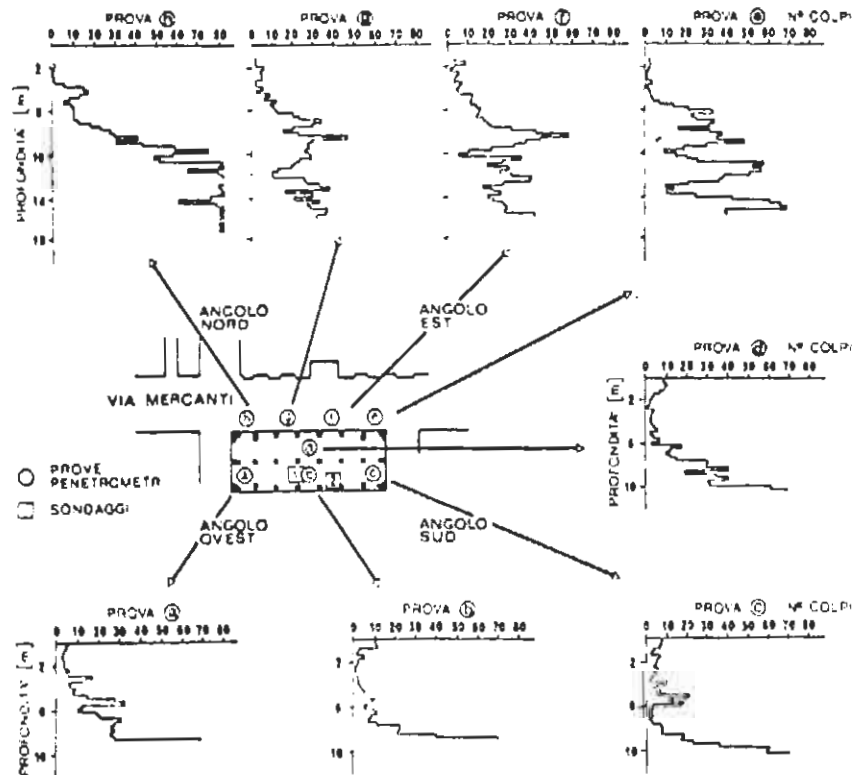
Gli attuali mezzi di prospezione geotecnica in-situ (sondaggi, prove penetrometriche, prove pressiometriche, ecc.) e quelli di laboratorio consentono per contro una caratterizzazione accurata ed estremamente utile del terreno di supporto.

Nel caso del Palazzo della Regione proprio queste prove hanno consentito di formulare una diagnosi definitiva delle lesioni dell'edificio [1].

In quell'occasione sono state realizzate sia prove penetrometriche dinamiche (i cui risultati sono illustrati in Fig. 16), sia sondaggi con esecuzione di prova SPT.

Dai sondaggi si è potuta rilevare la presenza di uno strato di materiale di ri-

Fig. 16



porto (con presenza di breccia di mattoni, pietrisco, inclusioni torbose) anche al disotto del piano di fondazione posto a quota -6.00 m.

Dalle prove penetrometriche dinamiche si osserva che la zona con minori caratteristiche di resistenza a quota -6.00 m. segue la direttrice che congiunge l'angolo Sud all'angolo Nord.

Questo trova riscontro nelle osservazioni precedentemente esposte a proposito del quadro degli strapiombi e di quello delle lesioni, che sembravano indicare maggiori cedimenti proprio in questi punti.

Prove di laboratorio, seppur limitate all'analisi granulometrica e alla determinazione del contenuto di sostanza organica nel terreno, lasciano ragionevolmente supporre che lo strato superficiale fino a quota -8.00 m. circa costituisca un antico riporto di bonifica palustre.

Questo spiegherebbe tra l'altro il notevole approfondimento delle fondazioni per un edificio che originariamente raggiungeva una altezza fuori terra di appena 15 m.

Lo studio del terreno va completato naturalmente con dati sull'evoluzione del livello di falda freatica nella zona dell'edificio. I rilievi effettuati sui pozzi di approvvigionamento idrico della città consentono spesso una accurata ricostruzione.

Nel caso di Milano la falda è passata negli ultimi 20 anni da quota -9 m. a quota -29 m., con una incidenza notevole sull'incremento dello stato di sforzo efficace sul terreno e quindi sul suo cedimento.

3.3) I carichi

L'esame delle condizioni del manufatto dal punto di vista dei carichi applicati deve comprendere non solo la situazione attuale, ma cercare di ricostruire le modifiche rispetto alla situazione originaria per eventi non previsti o per manomissioni del tessuto murario (sopralzi, aperture, modifiche dello schema strutturale, fenomeni endogeni quali terremoti o movimenti franosi, ecc.).

L'indagine storica ancora una volta fornisce un aiuto indispensabile a tale ricostruzione e il rilievo geometrico (con l'individuazione fisica delle aggiunte o sottrazioni di materiale) contribuisce a completare il quadro.

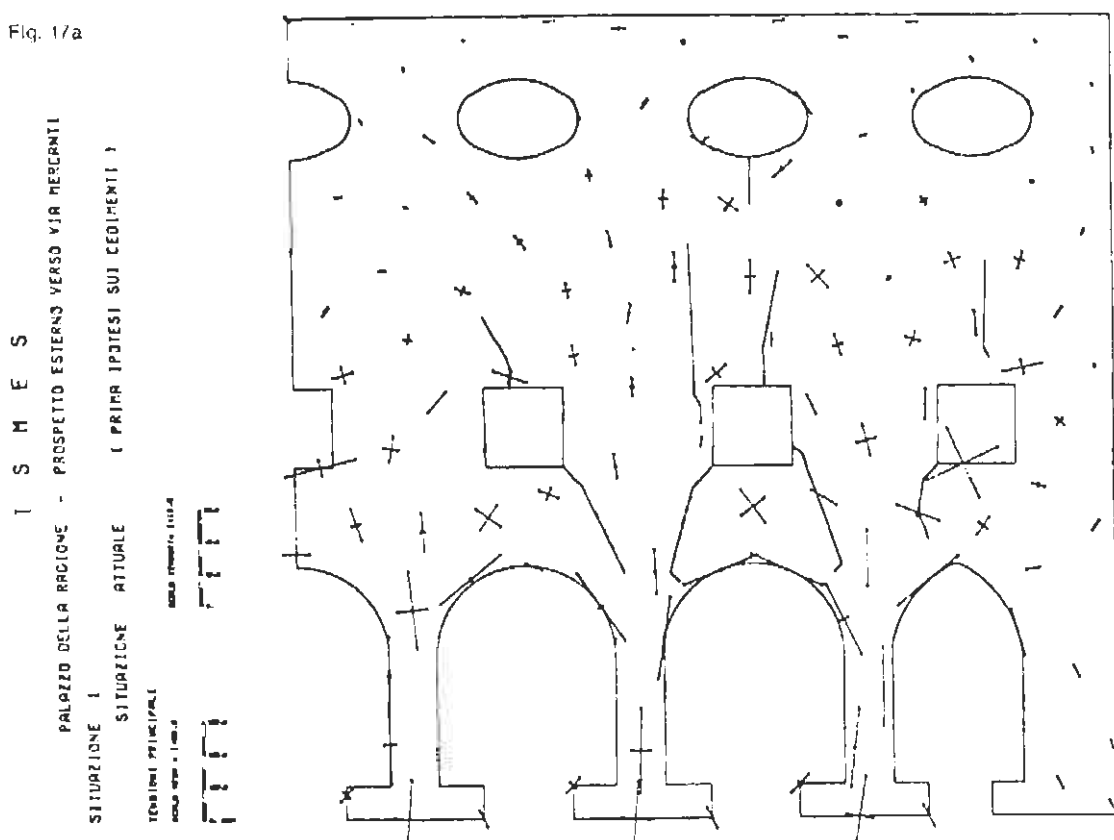
Nel caso del Palazzo della Regione l'indagine si è avvalsa del modello ad elementi finiti precedentemente descritto con cui si sono simulate le condizioni statiche vissute dall'edificio in diverse epoche.

Nella fase preliminare è stato considerato l'edificio al termine della costruzione senza sopralzo, senza cedimenti né presenza di fessure.

I carichi forniti dal peso proprio delle pareti, del tetto e del pavimento provocano alla base dei pilastri e alle reni degli archi sforzi di compressione e trazione pari a 20 Kg./cm² e 4,5 Kg./cm² rispettivamente, valori che sarebbero stati sopportabili dall'edificio in assenza di cedimenti.

Si è considerato poi l'effetto dei cedimenti differenziali del terreno imponendo ai pilastri una quota-parte dei cedimenti finali ottenuti mediante il processo di identificazione in precedenza descritto al paragrafo (3.1).

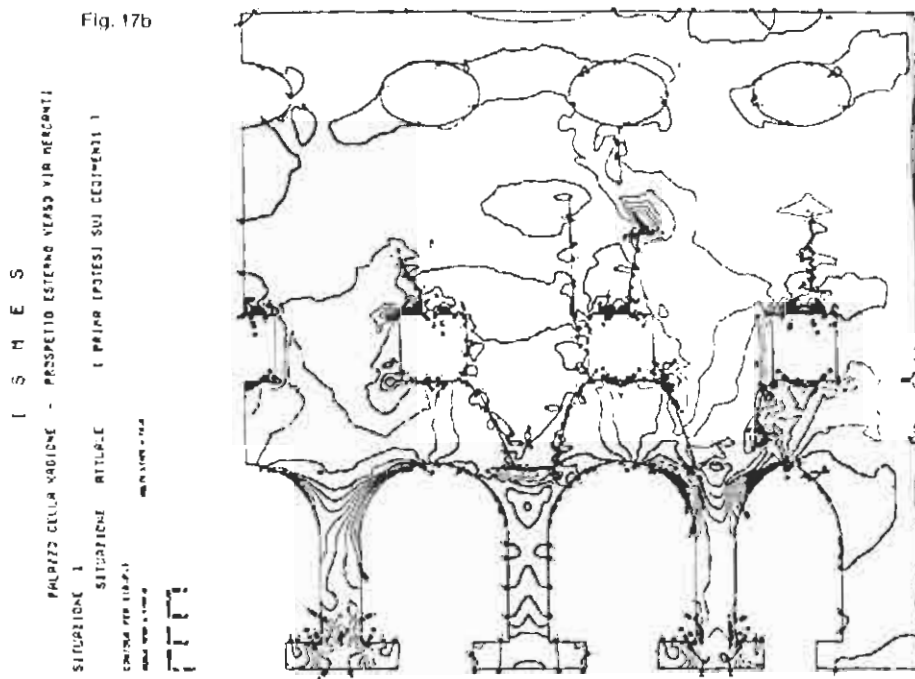
Fig. 1/a



Benché condotta in campo elastico, l'analisi evidenzia la rimarchevole corrispondenza tra le zone soggette ad uno stato di prevalente trazione e quelle in cui si osserva la presenza delle fessure.

In una fase successiva si è considerata poi la situazione del Palazzo al giorno d'oggi, comprendendo quindi soprizzo, cedimenti delle fondazioni e presenza delle fessure.

La sovrapposizione dei vari effetti fornisce i quadri tensionali illustrati nella Fig. 17 a) b) c) per la parete longitudinale e nella Fig. 18 a) b) c) per la parete trasversale.



A verifica dei risultati, è gratificante osservare che esiste una buona corrispondenza tra lo stato tensionale calcolato e quello ottenuto sperimentalmente in un limitato numero di punti mediante la prova con i martinetti piatti descritta al paragrafo (3.2).

Nella valutazione delle sollecitazioni e del conseguente stato di sforzo non si è tenuto conto delle alterazioni causate dalle aperture praticate nelle pareti e dai risarcimenti murari.

Data la notevole rilevanza dei cedimenti vincolari è tuttavia plausibile che il quadro tensio-deformativo ottenuto descriva con sufficiente approssimazione la situazione attuale.

A completare lo studio degli aspetti statici, è stata poi condotta una analisi tridimensionale sull'intero edificio, schematizzati a telaio con lo scopo di valutare le sollecitazioni indotte nelle catene trasversali esistenti dagli strapiombi e dai cedimenti delle fondazioni. Il modello adottato è rappresentato in Fig. 19 e l'esame dei risultati è tuttora in corso.

4) La fase di diagnosi e controllo

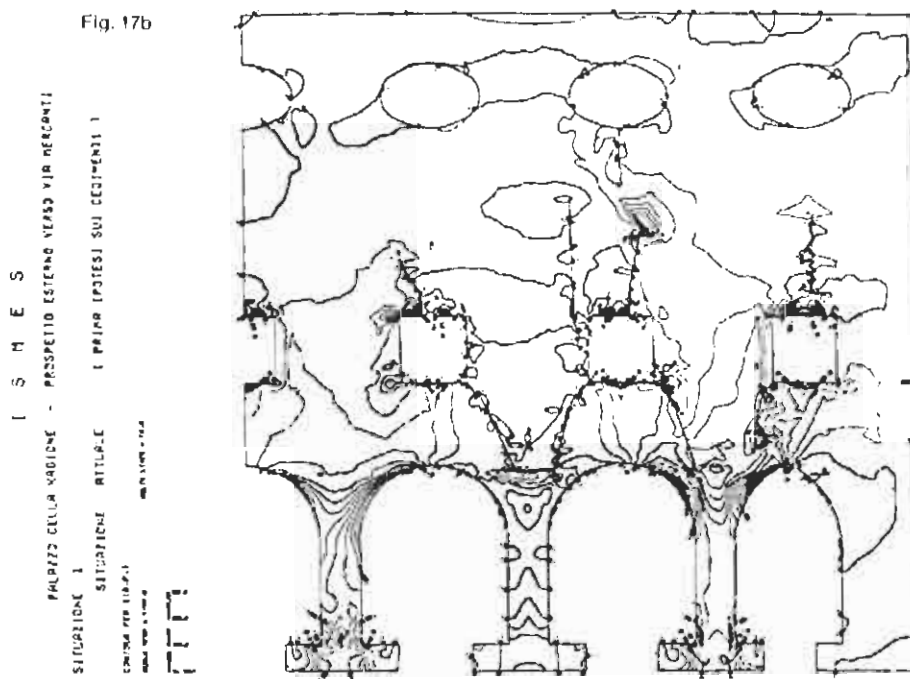
Sulla base degli elementi ottenuti, che riguardano la geometria, i materiali e i carichi della struttura, si è usualmente in grado:

- di interpretare la natura dei dissesti manifestatasi;
- di individuarne le cause;
- di formulare un modello di comportamento dell'edificio al quale riferirsi per una verifica della sicurezza sia nelle condizioni attuali sia sotto nuovi carichi.

Benché condotta in campo elastico, l'analisi evidenzia la rimarchevole corrispondenza tra le zone soggette ad uno stato di prevalente trazione e quelle in cui si osserva la presenza delle fessure.

In una fase successiva si è considerata poi la situazione del Palazzo al giorno d'oggi, comprendendo quindi soprizzo, cedimenti delle fondazioni e presenza delle fessure.

La sovrapposizione dei vari effetti fornisce i quadri tensionali illustrati nella Fig. 17 a) b) c) per la parete longitudinale e nella Fig. 18 a) b) c) per la parete trasversale.



A verifica dei risultati, è gratificante osservare che esiste una buona corrispondenza tra lo stato tensionale calcolato e quello ottenuto sperimentalmente in un limitato numero di punti mediante la prova con i martinetti piatti descritta al paragrafo (3.2).

Nella valutazione delle sollecitazioni e del conseguente stato di sforzo non si è tenuto conto delle alterazioni causate dalle aperture praticate nelle pareti e dai risarcimenti murari.

Data la notevole rilevanza dei cedimenti vincolari è tuttavia plausibile che il quadro tensio-deformativo ottenuto descriva con sufficiente approssimazione la situazione attuale.

A completare lo studio degli aspetti statici, è stata poi condotta una analisi tridimensionale sull'intero edificio, schematizzati a telaio con lo scopo di valutare le sollecitazioni indotte nelle catene trasversali esistenti dagli strapiombi e dai cedimenti delle fondazioni. Il modello adottato è rappresentato in Fig. 19 e l'esame dei risultati è tuttora in corso.

4) La fase di diagnosi e controllo

Sulla base degli elementi ottenuti, che riguardano la geometria, i materiali e i carichi della struttura, si è usualmente in grado:

- di interpretare la natura dei dissesti manifestatasi;
- di individuarne le cause;
- di formulare un modello di comportamento dell'edificio al quale riferirsi per una verifica della sicurezza sia nelle condizioni attuali sia sotto nuovi carichi.

Fig. 18b

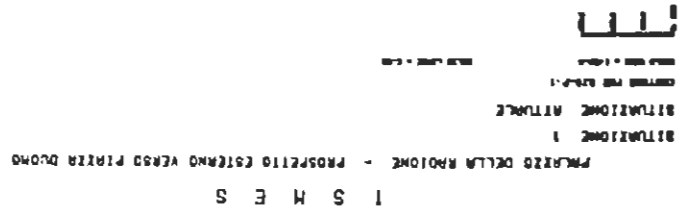


Fig. 18c

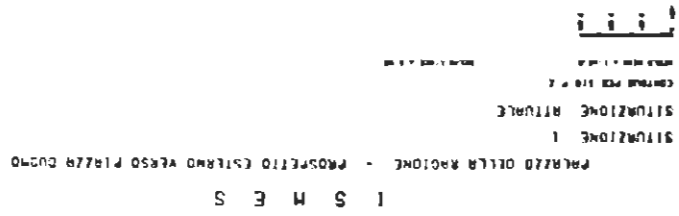
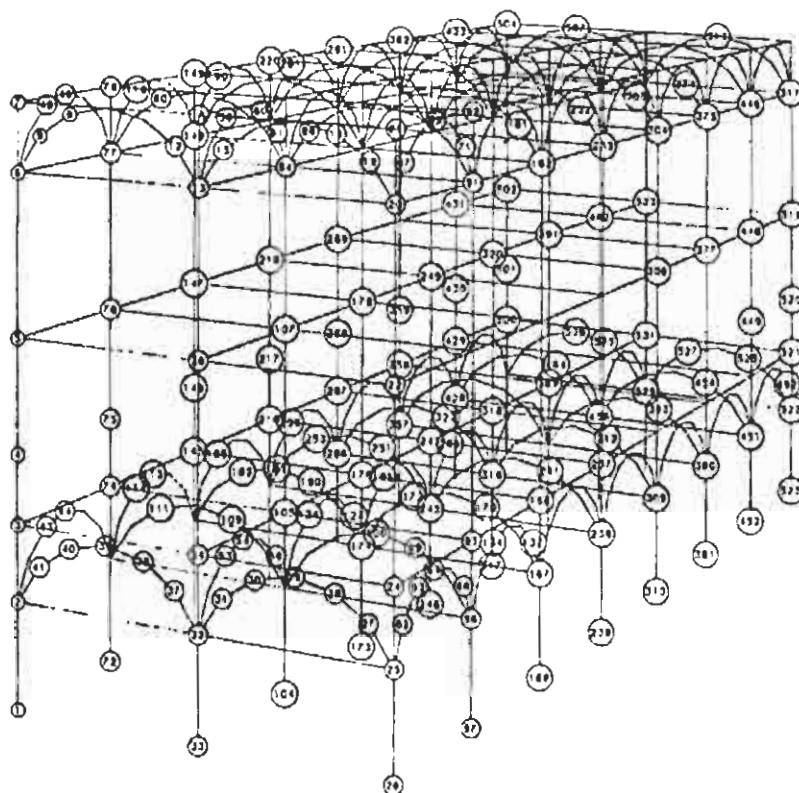


Fig 19

I S M E S

..... RETICOLO TELATO SPAZIALE PALAZZO DELLA RAGIONE

PROSPETTIVA
 SPORTEGGI LUNGO GLI ASSI X, Y, Z (IN CM.)
 ANGOLI DI ROTAZIONE AGLI ASSI X, Y, Z (IN GRADI)
 DISTANZA ED ALTEZZA DEL PUNTO DI FISSA (IN CM.)
 DISTANZA ED ALTEZZA RISPETTIVE ALL'INCINGHIAIO
 RAPPORTO TRA LE DIMENSIONI DESTINATA E IL MODELLO
 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
 -36.00 -36.00 1000.00 1000.00 88.00 30.34
 0.00007



Con specifico riferimento alle Indagini condotte sul Palazzo della Regione, esse hanno consentito di stendere un primo elenco delle cause cui il degrado è imputabile. Tra le principali si possono elencare:

— i cedimenti differenziali delle fondazioni, differiti nel tempo, manifestatisi sia dopo la costruzione originaria sia dopo l'aggiunta del sopralzo;

— la insufficienza o la non tempestiva posa in opera di catene trasversali adatte a resistere alle spinte esercitate dagli archi e dal tetto;

— la mancanza di catene longitudinali e l'insufficienza dei contrafforti che hanno portato a strapiombi nelle facciate trasversali e lesioni nelle volte superiori;

— il peso dell'Archivio notarile e parzialmente il peso del tetto appoggiato su alcuni dei pilastri centrali, che ha condotto a cedimenti differenziali anche in senso trasversale all'edificio;

— le varie operazioni di riassetto delle murature e dei pilastri del portico con sostituzione di materiali, nonché l'apertura e chiusura di porte e finestre che hanno causato una ridistribuzione degli sforzi nelle pareti e l'introduzione di resistenze disomogenee tra i vari elementi strutturali.

Occorre sottolineare che il quadro fessurativo di qualsiasi edificio è sempre un fatto complesso legato alla natura e al comportamento nel tempo dei materiali coinvolti e all'evoluzione della storia dei carichi.

A questo scopo è conveniente che la diagnosi sulle condizioni attuali dell'edificio sia accompagnata dal controllo dell'evoluzione del quadro fessurativo.

Sulle pareti del Palazzo della Regione sono state poste in opera più di 150 posizioni fisse per la lettura dei movimenti delle lesioni da effettuare periodicamente mediante estensimetri rimovibili.

Le basi (costituite da 3 punti fissi, di cui una su un lato della fessura e due sull'altro lato Fig. 20) consentono di risalire sia allo scorrimento lungo (u) sia alle aperture dei due lembi (v) mediante le formule seguenti:

Fig. 20



$$u = \frac{(A'B - AB) \cdot \text{sen} \beta' - (A'C - AC) \cdot \text{sen} \alpha'}{\text{sen} \alpha' \cdot \text{cos} \beta' + \text{cos} \alpha' \cdot \text{sen} \beta'}$$

$$v = \frac{(A'B - AB) \cdot \text{cos} \beta' + (A'C - AC) \cdot \text{cos} \alpha'}{\text{sen} \alpha' \cdot \text{cos} \beta' + \text{cos} \alpha' \cdot \text{sen} \beta'}$$

Attraverso il modello numerico della struttura (utilizzato secondo modalità analoghe a quanto descritto nel paragrafo 3.1) si potrà risalire al cinematisimo globale secondo cui l'edificio si muove.

Ciò consentirà, eventualmente, di confermare le cause delle lesioni oggi presenti sulle pareti e di intervenire puntualmente con operazioni mirate.

Vale la pena di sottolineare che esistono attualmente strumenti estremamente sofisticati per la misura sperimentale di variazioni di lunghezza, angoli, quote, ecc. a cui si può fare ricorso in caso di necessità particolari e che qui non verranno descritti [12].

Nello spirito di un controllo globale del comportamento degli edifici e allo scopo di cogliere il decorso del degrado strutturale o gli effetti e l'efficacia dei restauri strutturali, è possibile utilizzare anche prove dinamiche sull'intero edificio.

È noto infatti che le caratteristiche dinamiche di una struttura (definite dalle frequenze proprie dei primi modi di vibrare, dalla loro forma e dagli smorzamenti associati) sono funzioni delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, della geometria e della tipologia della struttura.

Per un dato edificio, una volta valutata e tarata, seppure in modo empirico, la correlazione tra le caratteristiche dei materiali e la risposta a sollecitazioni note, la ripetizione di prove dinamiche a periodici intervalli di tempo consentirebbe un monitoraggio rapido ed economico delle condizioni globali della struttura al fine di individuarne tempestivamente un eventuale degrado.

Nel caso del Palazzo della Regione si è utilizzata questa tecnica nella prima fase di indagini e si sono rilevate le vibrazioni indotte dal passaggio di convogli della Metropolitana, la cui linea passa a ridosso dell'edificio.

L'elaborazione dei dati è consistita nel tracciamento di diagrammi tempo/velocità di vibrazioni ed è stata completata dalla analisi di frequenza di tali vibrazioni.

In assenza di frequenze dominanti si è operato un confronto tra i segnali registrati in due posizioni vicine, allo scopo di evidenziare picchi di amplificazione delle risposte dovuti alle frequenze proprie dell'edificio.

L'andamento della funzione di coerenza (che esprime il grado di correlazione tra i due segnali) presenta valori prossimi ad 1 alle frequenze 3,7 / 11,2 / 19,6 Hz, che possono quindi essere interpretate come frequenze proprie.

A conclusione della fase diagnostica, una volta individuate le manifestazioni e le cause del degrado, è importante valutarne quantitativamente gli effetti sull'assetto statico dell'edificio in modo da decidere sull'opportunità o meno dell'intervento di restauro e sulle sue modalità nello spazio e nel tempo.

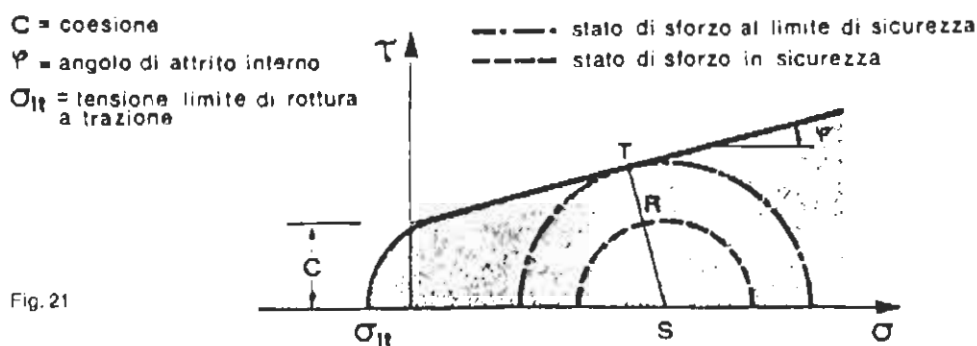
Questo può essere realizzato mediante la valutazione del fattore di sicurezza residuo dell'edificio nei confronti di fenomeni critici, quali il collasso globale o locale.

Nel caso del Palazzo della Regione si è fatto ricorso alla sola valutazione di un'indice di sicurezza «locale» nei confronti della rottura del materiale per eccesso di sollecitazione.

Le caratteristiche di resistenza della muratura sono individuate attraverso la curva intrinseca di picco nel piano di Mohr (δ, τ) rappresentata in Fig. 21. La sua linearizzazione permette una facile descrizione analitica in quanto utilizza i due soli parametri di resistenza c e φ della relazione di Mohr-Coulomb: $\tau = c + \sigma \tan \varphi$

È intuitivo che se lo stato di sforzo in un punto del materiale è tale che il relativo cerchio di Mohr è completamente contenuto nella zona tratteggiata in figura, regione «di sicurezza», si può sostenere che localmente il materiale è in sicurezza per quanto riguarda la rottura.

È evidente, da quanto illustrato, che lo stato di sforzo limite, dal punto di vista della resistenza puntuale del materiale, è quello in cui il relativo cerchio di Mohr è tangente alla curva di resistenza.



Il problema è quello di definire un indice di cemento locale che dia una misura di quanto il corrispondente cerchio di Mohr è contenuto nella zona tratteggiata, cioè del grado di sicurezza del materiale nel punto considerato.

I rapporti fra i raggi dei due cerchi di Mohr, rappresentanti rispettivamente lo stato di sforzo al limite di sicurezza (TS) e quello di un generico punto (RS), viene assunto come indice di sicurezza:

$$\eta = \frac{TS}{RS} = \text{indice di sicurezza}$$

Risulta evidente che:

per $\eta > 1$: condizione di sicurezza locale;

con $\eta = 1$: condizione limite di sicurezza;

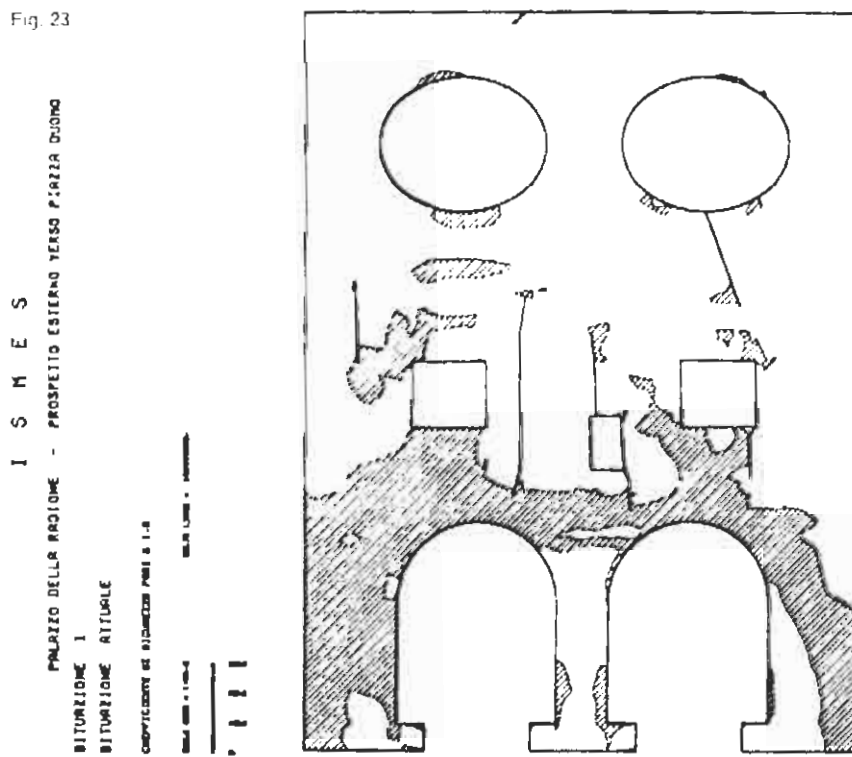
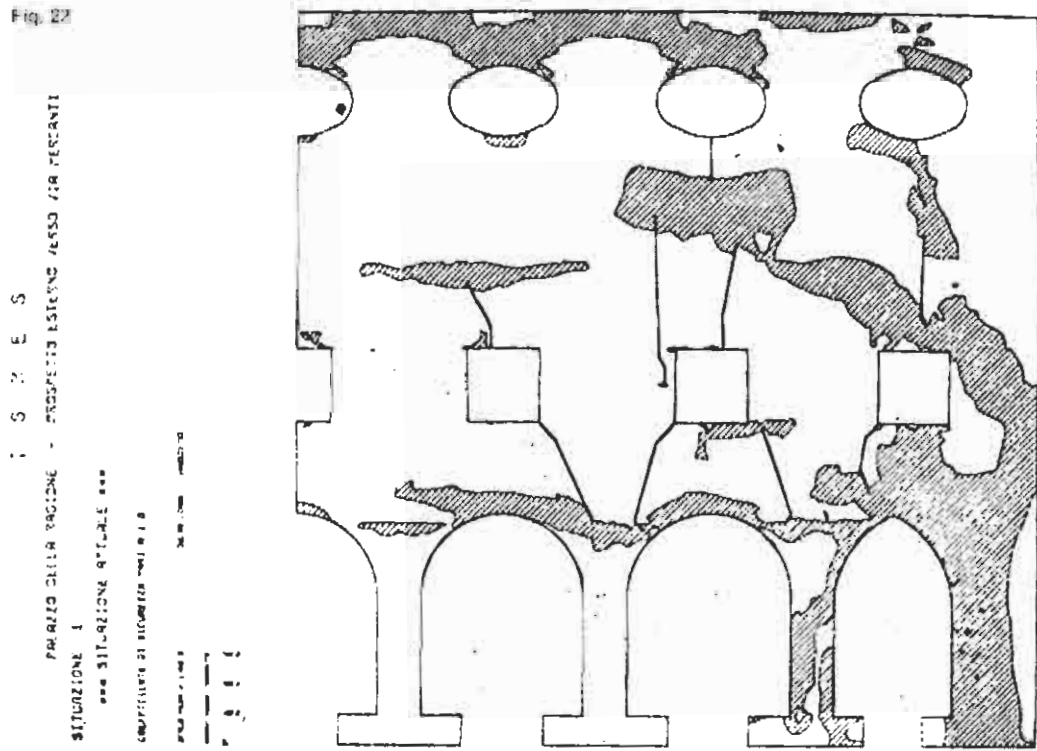
per $\eta < 1$: condizione oltre il limite di resistenza e quindi rottura locale del materiale.

Una indicazione grafica delle zone suscettibili di crisi locale, può essere ottenuta tracciando le linee di livello della funzione «indice di sicurezza locale».

Nelle Figg. 22 e 23 sono illustrate le zone soggette a più elevato rischio locale per entrambe le pareti longitudinali e trasversali.

Questi risultati sintetizzano la situazione statica attuale dell'edificio e consentono di passare con sufficiente cognizione di causa alla fase di carattere più propriamente terapeutico, in cui coesistono esigenze di carattere tecnico, estetico ed economico, talora difficili da armonizzare.

L'intervento di restauro che mantiene o ripristina l'organismo originario dell'opera architettonica, incide sui costi di esercizio. Questi vanno valutati in relazione alla durata stimata (o richiesta) dell'edificio e vanno confrontati con i costi di manutenzione, suscettibili di aumento nel tempo per l'accentuarsi di fenomeni di degrado. È quindi un'accurata analisi costi-benefici ad avere l'ultima parola.



Per quanto riguarda la parte più propriamente tecnica, la scelta dell'intervento di minima entità che consente di ripristinare un desiderato grado di sicurezza può ancora una volta, essere simulata mediante il modello numerico già utilizzato in fase diagnostica. La simulazione su modello fisico in scala ridotta, quando possibile, risulta certo un complemento estremamente utile.

I criteri di intervento si potranno così scegliere, a ragion veduta, tra quelli che *mutano la geometria* (consolidamento dei vincoli, riduzione delle lesioni, ripristino dei collegamenti), *mutano il materiale* (iniezioni consolidanti, integrazioni e sostituzioni), *mutano i carichi* (alleggerimenti, ridistribuzioni dei carichi, introduzione di coazioni mediante tiranti).

5) Considerazioni conclusive

La valutazione del degrado strutturale degli edifici in muratura è sicuramente un'operazione complessa al cui buon risultato concorrono vari fattori: grado di conoscenza della struttura e dei materiali, informazioni storiche, raffinatezza dei mezzi sperimentali e di analisi, esperienza di chi è chiamato a rispondere alle domande sul «se, dove, come e quando» effettuare il restauro.

È altresì vero che ognuna delle informazioni ottenute è affetta da inevitabili incertezze che si ripercuotono conseguentemente sulla diagnosi e sulle proposte di intervento.

Risulta pertanto estremamente produttivo organizzare il progetto di restauro in modo aperto e interattivo.

L'osservazione continua dei risultati conseguiti con gli interventi consente infatti di utilizzare le informazioni acquisite nelle prime fasi di lavoro per meglio definire le fasi successive.

Il problema si presenta particolarmente delicato naturalmente quando l'edificio degradato appartenga al patrimonio monumentale e culturale del paese. In tal caso, ad un grado ancor più elevato, etica, cultura professionale e sensibilità devono coesistere nel tecnico preposto alla diagnosi, cui, per così dire, viene affidata la sopravvivenza dell'opera architettonica.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il prof. M. Dezzi Bardeschi (incaricato del progetto di restauro del Palazzo della Regione), l'Ufficio tecnico del Comune di Milano (direttore dei lavori) e l'ISMES di Bergamo (esecutore della parte numerica e sperimentale) per la documentazione messa a disposizione.

Parte di questa ricerca è stata finanziata con fondi MPI.

BIBLIOGRAFIA

- [1] JURINA L., BONALDI P., ROSSI P.P., *Osservazioni sulle vicende statiche e geotecniche del Palazzo della Regione di Milano*, XIV Conz. Naz. di Geotecnica, Firenze, 1980.
- [2] CUOMO DI CAPRIO N., MARTINI M., SPIGNOLO G., *Analisi di termoluminescenza applicata ai laterizi del Palazzo della Regione di Milano: esemplificazione del metodo*, in *La conservazione del costruito*, a cura di M. Dezzi Bardeschi e C. Sartini, ed. CLUP, 1981.
- [3] MASTRODICASA S., *Dissesti statici delle strutture edilizie*, ed. Hoepli, 1981.
- [4] EYKHOFF P., *System Identification*, ed. J. Wiley and Sons, Londra, 1974.
- [5] DISTEFANO N., *Nonlinear Processes in Engineering*, Academic Press, New York, 1974.
- [6] BONALDI P., JURINA L., *Determination of foundation settlements through analysis of cracks in old masonry buildings*, X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981.
- [7] FATTAL S.G., CATTANEO L.E., *Evaluation of Structural Properties of Masonry in Existing Buildings*, NBSIR 74-520, National Bureau of Standards, Washington, 1974.
- [8] ROSSI P.P., *Prove distruttive e non distruttive per la caratterizzazione meccanica dei materiali*, Corso di restauro edilizio e monumentale, ISMES, Bergamo, 1980.
- [9] JURINA L., PEANO A., *Characterization of Brick Masonry Stiffness By Numerical Modeling and In-Situ Flat-Jack Test Results*, 6th International Brick Masonry Congress, Roma, 1982.
- [10] CIVIDINI A., JURINA L., GIODA G., *Some Aspects of Characterization Problems in Geomechanics*, International J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pag. 487-503, 1981.
- [11] CARABELLI E., *I metodi geofisici nelle indagini su vecchie murature*, Bollettino ISMES, n. 131, 1980.
- [12] GIUSSANI A., *Strumenti e metodi di rilievo per il controllo statico*, Corso sul recupero strutturale del patrimonio edilizio esistente, Centro Edile, Milano, 1981.

DIDASCALIE DELLE FIGURE

Fig. 1

Il Palazzo della Regione di Milano visto da Piazza Mercanti

Fig. 2a

Lesioni da flessione e taglio su pareti in muratura causate da cedimenti intermediari

Fig. 2b

Lesioni da flessione e taglio su pareti in muratura causate da cedimenti terminali

Fig. 3

Lesioni principali sulle facciate esterne del Palazzo della Regione

- (a) lato Via Mercanti
- (b) lato Piazza Mercanti
- (c) lato Palazzo Parigiarola
- (d) lato Piazza Duomo

Fig. 4

Modello numerico ad elementi finiti adottato per simulare il comportamento del Palazzo della Regione

Fig. 5

- (a) Reticolo di suddivisione della parte longitudinale
- (b) Reticolo di suddivisione della parte trasversale

Fig. 6

Spostamenti dei punti di contorno della parete longitudinale provocati da:

- (a) cedimento unitario della 4^a colonna
- (b) rotazione unitaria della 4^a colonna
- (c) cedimento unitario della 3^a colonna
- (d) rotazione unitaria della 3^a colonna
- (e) cedimento unitario della 1^a colonna

Fig. 7

Cedimenti «più verosimili» delle colonne della parete longitudinale

Fig. 8

Spostamenti dei punti di contorno della parete trasversale provocati da:

- (a) cedimento unitario della colonna d'angolo
- (b) rotazione unitaria della colonna d'angolo
- (c) cedimento unitario della colonna centrale
- (d) rotazione unitaria della colonna centrale

Fig. 9

Cedimenti «più verosimili» delle colonne della parete trasversale

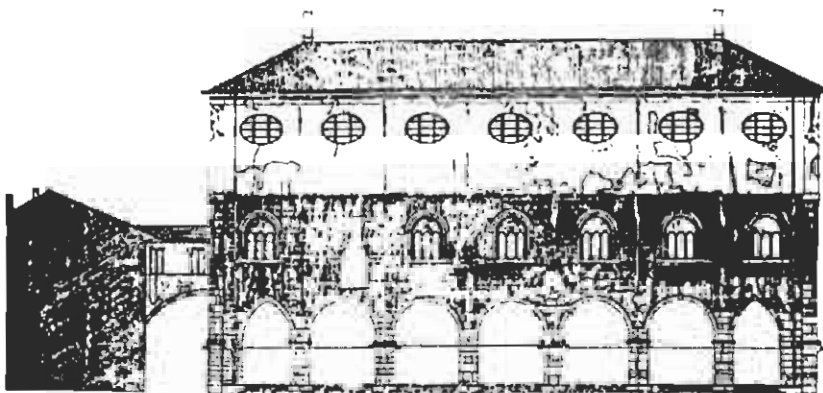
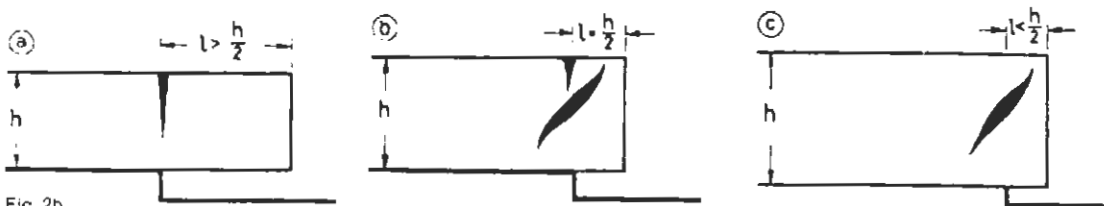


Fig. 10
Prove standard su elementi di muratura.

Fig. 11
Prova con martinetti piatti.
Fase 1: misurazione della convergenza

Fig. 12
Prova con martinetti piatti.
Fase 1: introduzione del martinetto e ricarico della muratura

Fig. 13
Prova con martinetti piatti.
Fase 2: rilievo degli spostamenti relativi a vari livelli di carico

Fig. 14
Elemento modulare di muratura composto di 8 blocchi: 1 elemento mattone (M) e 7 prioni di malta (b, b, b, m, m, m, m).

Fig. 15
Procedura grafica per la determinazione dei moduli di Young del mattone e della malta (E_m , E_b)
Misure espresse in (MPa). E_m/E_b

Fig. 16
Posizione e risultati delle prove penetrometriche sul terreno condotte presso il Palazzo della Regione

Fig. 17
Quadro tensionale della parete longitudinale allo stato attuale.
(a) Tensioni principali di trazione e compressione
(b) Curve di isovalore delle tensioni principali di trazione
(c) Curve di isovalore delle tensioni principali di compressione

Fig. 18
Quadro tensionale della parete trasversale allo stato attuale.
(a) Tensioni principali di trazione e compressione
(b) Curve di isovalore delle tensioni principali di trazione
(c) Curve di isovalore delle tensioni principali di compressione

Fig. 19
Modello tridimensionale ad elementi finiti del Palazzo della Regione, schematizzato a telaio

Fig. 20
Posizione delle basi fisse per la misura dello scorrimento (u) e dell'apertura (v) di una fessione

Fig. 21
Dominio di rottura della muratura nel piano ($\sigma - \tau$)

Fig. 22
Zone soggette a rischio di collasso locale sulla parete longitudinale

Fig. 23
Zone soggette a rischio di collasso locale sulla parete trasversale

DIDASCALIE DELLE TABELLE

TABELLA II - Vedi la fotografia allegata con acclusa didascalia

TABELLA III - Cedimenti e rotazioni (più verosimili) ottenute per le colonne della parete longitudinale

	COLONNA			
	1	2	3	4
CEDEMENTI VERTICALI (cm.)	0,38	0,0	0,14	3,60
CEDEMENTI ORIZZONTALI (cm.)	0,0	-0,0	0,0	0,10
ROTAZIONI (gradi)	0,0	0,0	0,48	0,0

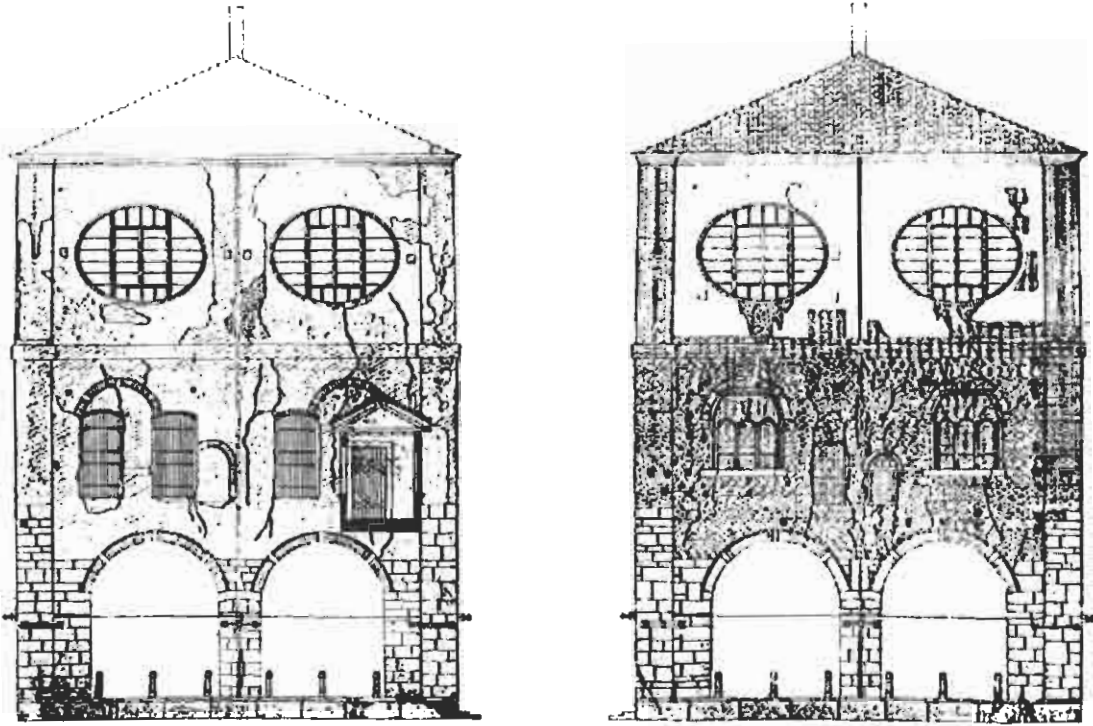


Fig. 3d

I S M E S
PALAZZO DELLA MEDICINE - PROSPETTO ESTERNO VERSO VIA MARCHETTI
SITUAZIONE 2
ROTAZIONE ORARIA DI UN GRADO SES. - ALLA BASE DELLA QUARTA COLONNA DALLA SINISTRA
Vedi anche: 30/1/1944
Vedi anche: 30/1/1944

Fig. 6h

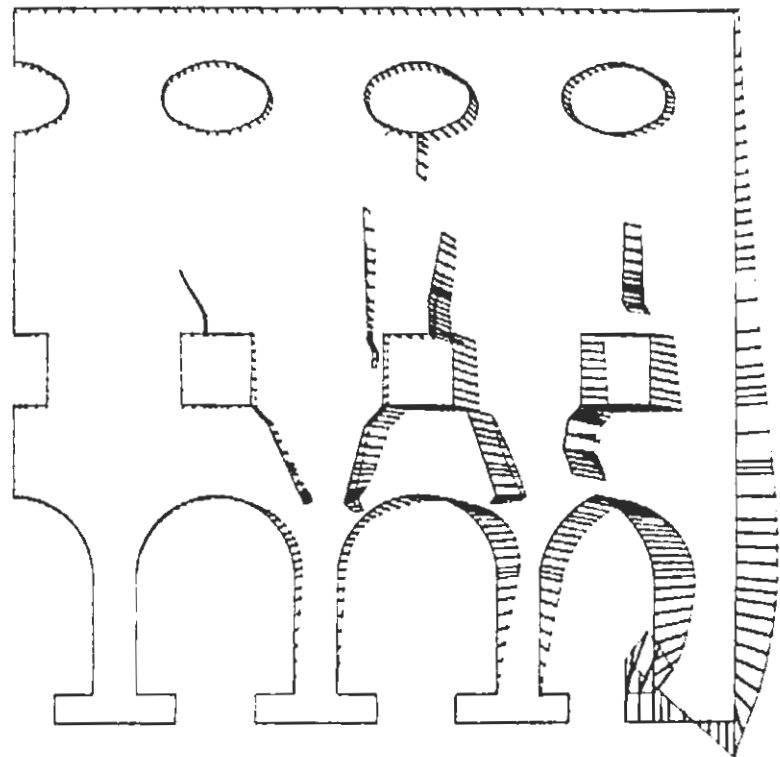


Fig. Cc

I S M E S
PALAZZO DELLA RAGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO VIA MERCANTI
SITUAZIONE 3
GEOMETRICO ALLA BASE DELLA TERZA COLONNA DALL' ASSE DI SIMMETRIA
ALTA 3,07/3,08 m
LARGA 1,10 m
LARGA 1,10 m

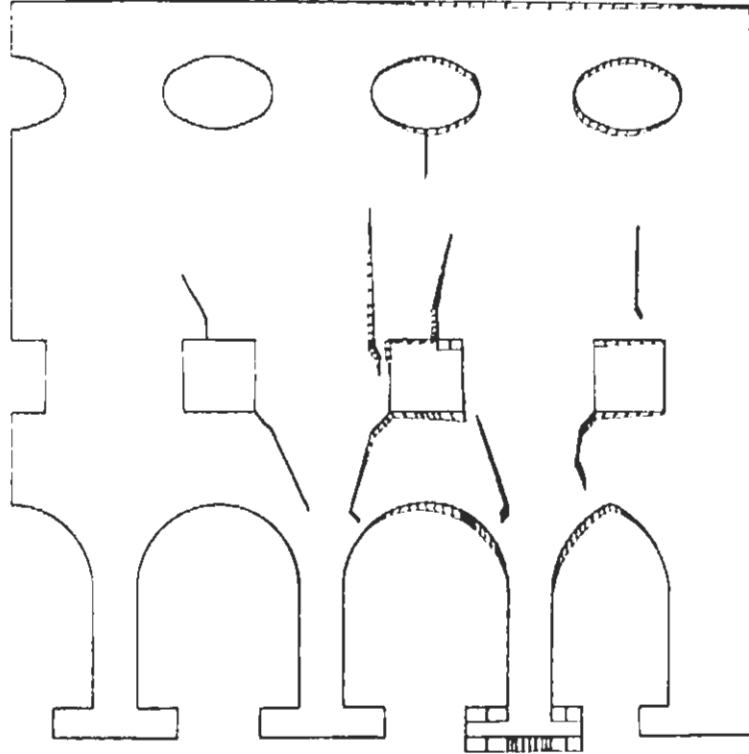


Fig. Cd

I S M E S
PALAZZO DELLA RAGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO VIA MERCANTI
SITUAZIONE 1
ROTAZIONE ORARIA DI UN GRADO SESS. - ALLA BASE DELLA TERZA COLONNA DALLA SIMMETRIA
ALTA 3,07/3,08 m
LARGA 1,10 m
LARGA 1,10 m

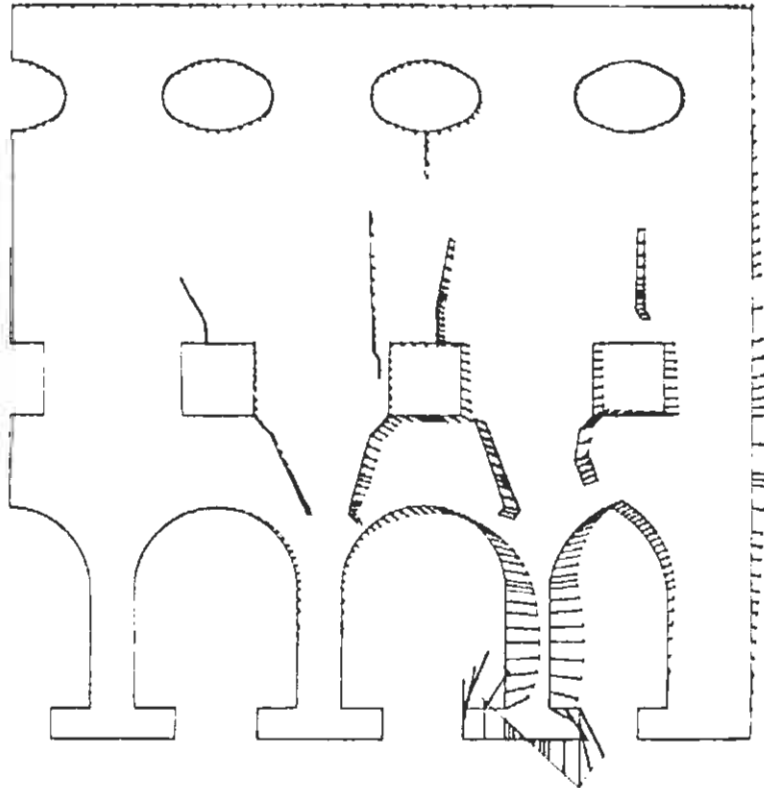


Fig. 6c

I S M E S
 PALAZZO DELLA REGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO VIA MERCANTI
 SITUAZIONE 2
 CEDIMENTO ALLA BASE DELLA PRIMA COLONNA DALL' ASSE DI SINISTRA
 V.P. 100/100/100
 V.P. 100/100/100
 V.P. 100/100/100

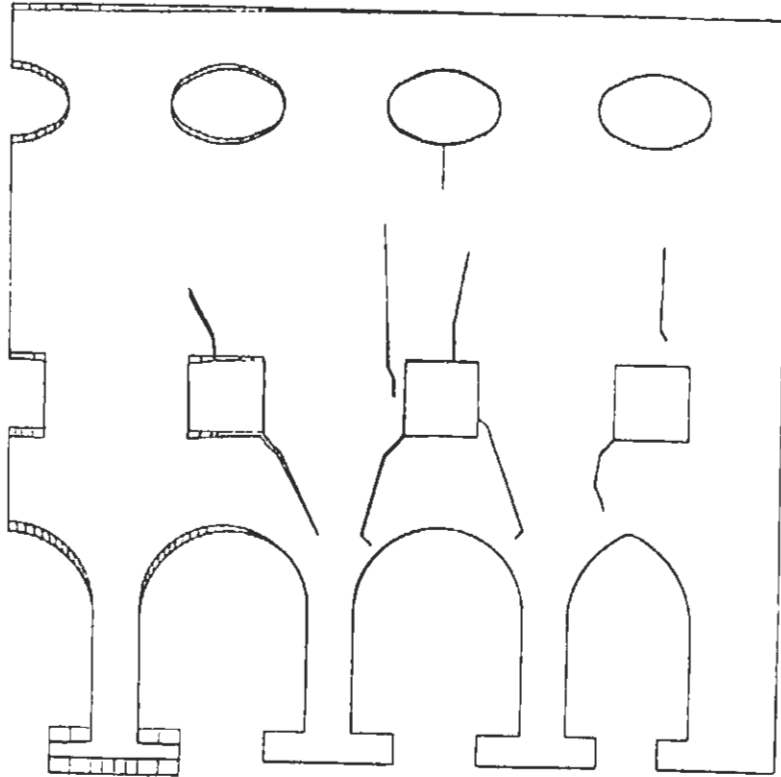


Fig. 8b

I S M E S
 PALAZZO DELLA REGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO PIAZZA CUNEO
 SITUAZIONE 1
 ROTAZIONE UNITARIA ANTICORRERIA ALLA BASE DELLA COLONNA DI SINISTRA
 V.P. 100/100/100
 V.P. 100/100/100
 V.P. 100/100/100

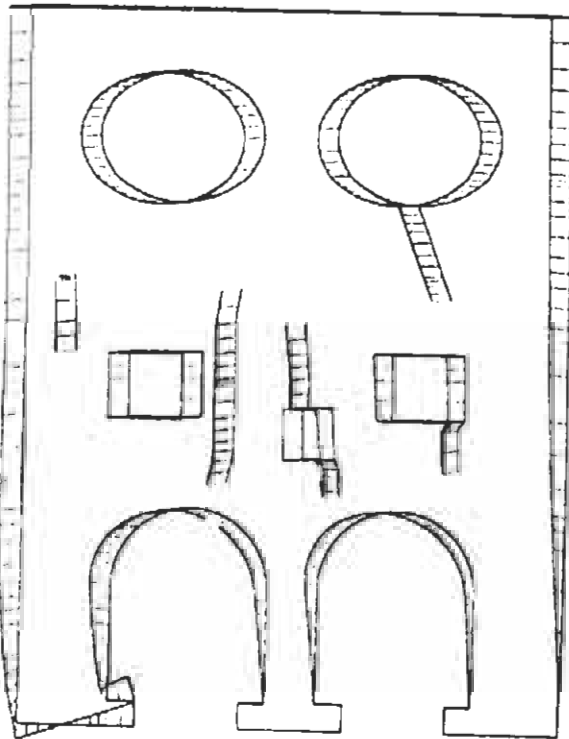


Fig. 8c

I S M E S

PALAZZO DELLA RAGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO PIAZZA DUDMO

SITUAZIONE 3

CECIMENTO ALLA BASE DELLA COLONNA CENTRALE

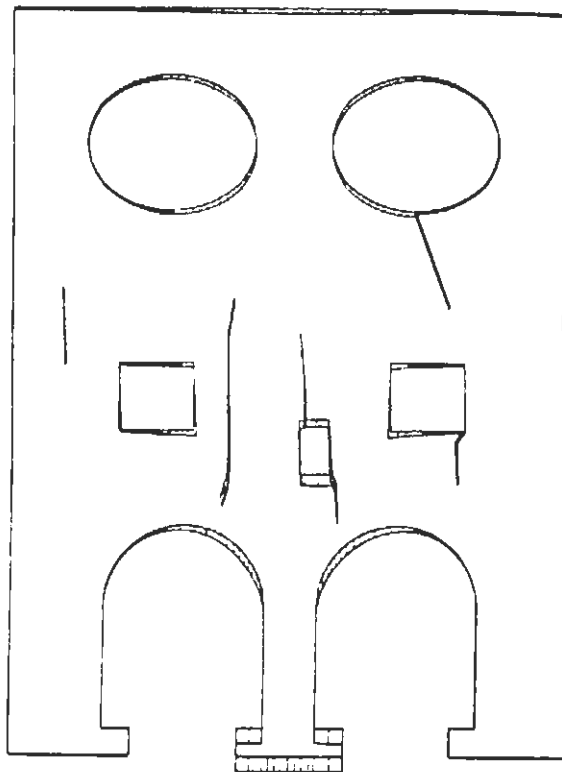


Fig. 8d

I S M E S

PALAZZO DELLA RAGIONE - PROSPETTO ESTERNO VERSO PIAZZA DUDMO

SITUAZIONE 2

AGITAZIONE UNITARIA ANTIDIBARIA ALLA BASE DELLA COLONNA CENTRALE

