



CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UNA SCALA IN PIETRA

L. Jurina

Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, Milano

A. A. Bassoli

Libero professionista, Milano

SOMMARIO

La conoscenza e la caratterizzazione dei materiali sono dati necessari e sempre più imprescindibili nel mondo del consolidamento. Ne consegue l'importanza di saper scegliere l'indagine più appropriata a seconda del caso studio e di saper interpretare correttamente il dato sperimentale.

La memoria espone gli esiti della campagna diagnostica condotta su una scala in elementi lapidei a Milano, eseguita con il supporto di misurazioni statiche e dinamiche.

1. STATO DI CRISI

A seguito della comparsa di alcune preoccupanti lesioni sugli elementi lapidei della scala di un edificio milanese di sette piani, risalente alla prima metà del secolo scorso, è iniziata un'analisi di dettaglio per giungere alla determinazione di quale fosse il suo stato di salute.

2. TECNOLOGIA COSTRUTTIVA

La scala dell'edificio è realizzata secondo le tecniche costruttive della prima metà del '900, ovvero con elementi monolitici in pietra (nel caso specifico in marmo bianco con venature grigie tipo Arabescato) inseriti direttamente nella muratura perimetrale, con schema statico a mensola. Dalle informazioni fornite in fase preliminare, riferite a saggi esplorativi precedentemente condotti, si evidenzia che sia le lastre delle pedate, sia le lastre che costituiscono le alzate, sono inserite nella muratura per una profondità di circa 15 cm.

Lo spessore delle lastre delle pedate è di 6 cm e quello delle alzate è di 4 cm.



Figura 1. Vista dall'alto della scala in esame.

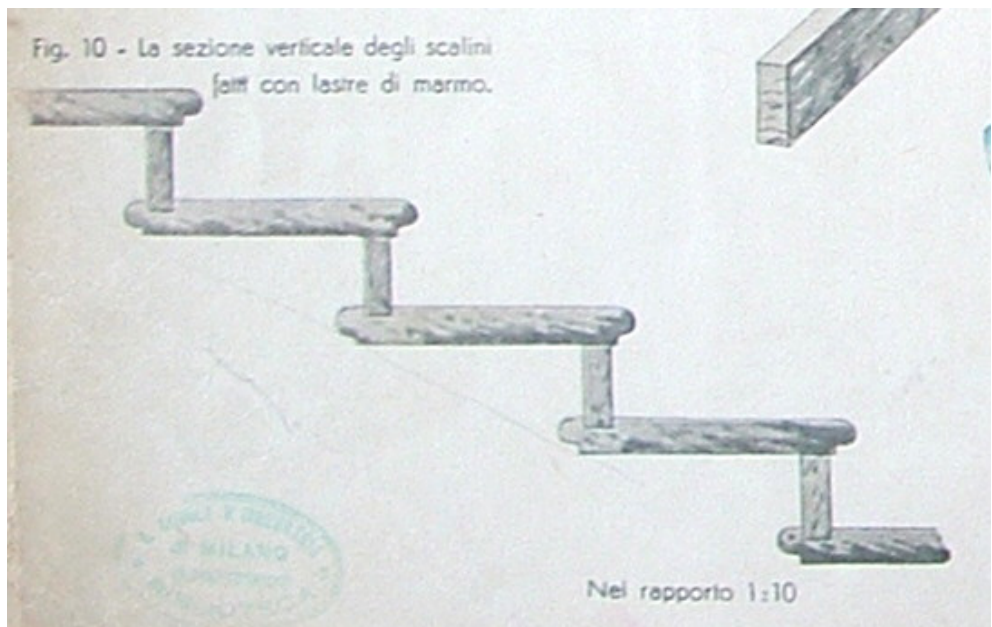


Figura 2. Esempi costruttivi riportati nel manuale Formenti di inizio secolo XX: dettaglio di una scala con mensole in pietra.

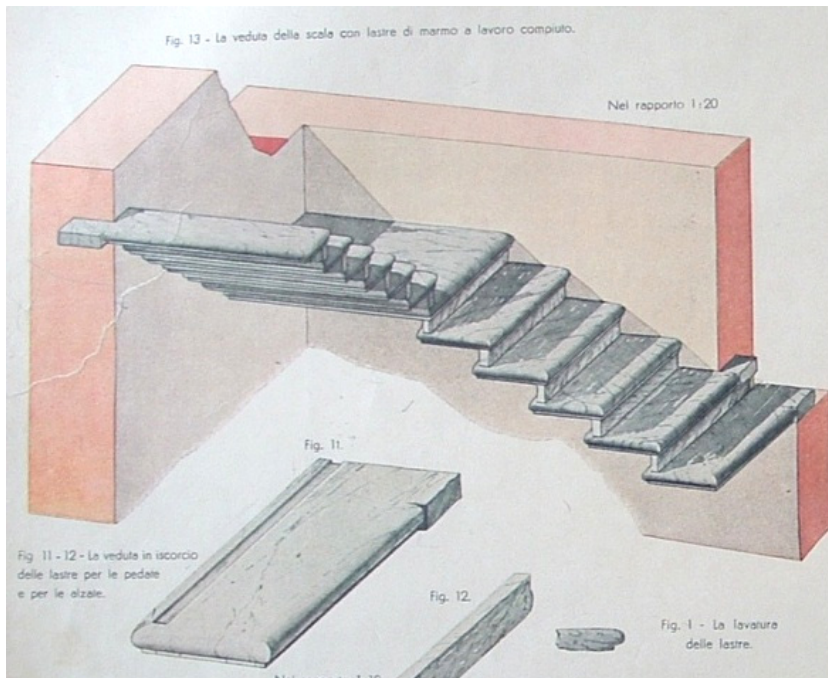


Figura 3. Esempi costruttivi riportati nel manuale Formenti di inizio secolo XX: tipologico di una scala con mensole in pietra.

3. DEGRADI E CRITICITÀ

Durante i primi sopralluoghi sono state osservate tre differenti degradi che interessano il vano scale e ne riducono le capacità strutturali.

Il primo degrado osservato consiste in un ramificato quadro fessurativo presente su una parete del vano scala. Le fessurazioni sono più ampie e frequenti nelle zone di sommità del vano e sono inclinate di circa 45° , andamento che suggerisce l'abbassamento differenziale di una porzione di muratura.

Gli altri due degradi strutturali osservati interessano direttamente le lastre delle scale e consistono nel disallineamento di alcuni elementi (manifestato dalla presenza di distacchi tra gli elementi di alzata e di pedata) e nella presenza di fessurazioni che interessano diverse lastre di alzata nelle rampe, nei piani più alti.

La soluzione tecnologica a suo tempo adottata per la scala non prevede una mutua collaborazione tra le singole mensole in pietra, le quali, soggette ad un carico, si trovano a lavorare singolarmente. Nella pratica del meccanismo resistente, le piccole deformazioni delle lastre, soggette ai carichi, fanno sì che le alzate forniscano un contributo aggiuntivo alla mensola, permettendo la parziale ripartizione del carico anche sugli elementi sottostanti. L'assenza di collegamento tra alzata e pedata, o come nel caso in esame, il distacco tra tali

elementi, impedisce la ripartizione del carico sopra descritta, riducendo in questo modo le iperstaticità e quindi il grado di sicurezza nei confronti dei carichi applicati.

Ogni singola pedata, in questo caso, lavora in modo isolato.

Le fessurazioni osservate sulle alzate sono verosimilmente causate da sollecitazioni flessionali e torsionali, la cui causa non è riconducibile a particolari sovraccarichi, ma probabilmente a piccoli movimenti differenziali delle singole lastre, che hanno portato alla concentrazione locale con accumuli di carico.

Le criticità evidenziate sono accentuate dalla peculiarità costruttiva della scala, la quale, come anticipato, presenta un comportamento a mensola singola per ogni pedata.

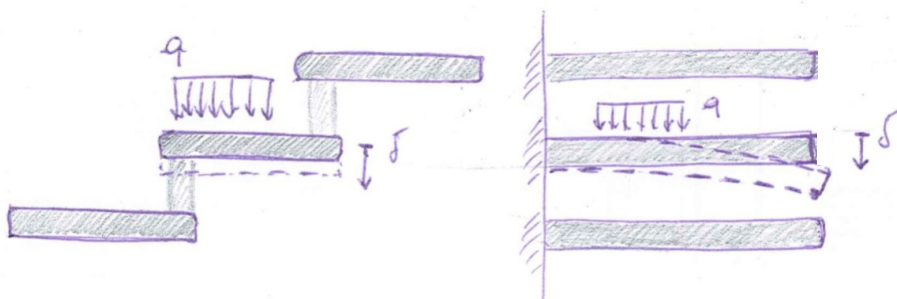


Figura 4. Schema statico delle lastre della pedata che funzionano a mensole indipendenti.

4. DIAGNOSTICA CONDOTTA

L'osservazione in situ della scala ha permesso di evidenziare una percettibile variabilità di risposta al carico. Già solo percorrendo la scala, infatti, ci si accorge che è differente la vibrazione delle singole pedate soggette alla sollecitazione indotta dalla persona in transito.

Per quantificare tali differenze si è proposto di condurre una campagna diagnostica che consentisse di individuare e caratterizzare tutti le singole pedate, con particolare attenzione all'individuazione delle peculiarità materiche e tecnologiche degli elementi costruttivi, e soprattutto per definire il degrado degli elementi stessi, così da ottenere un valido riferimento sullo stato di salute dei singoli gradini..

Le prove diagnostiche eseguite, affidate alla società di servizi specializzata P&P Consulting Engineers di Seriate, sono state:

- indagini dinamiche locali, ovvero misurazione delle frequenze proprie di vibrazione di tutte le pedate e di tutte le alzate mediante la registrazione con accelerometri triassiali posizionati sui singoli elementi;
- prove di carico statiche su elementi scelti a campione, per caratterizzare la risposta deformativa specifica;
- saggio ispettivo per la verifica della profondità di appoggio delle lastre.

Le misurazioni condotte con trasduttore accelerometrico applicato sulle singole lastre di marmo, sollecitate con un martello strumentato, hanno permesso di catalogare tutti gli ele-

menti a seconda della prima frequenza di vibrazione registrata, distinguendo quindi tre macro-raggruppamenti:

- elementi caratterizzati da un'alta frequenza (> 80 Hz);
- da una media frequenza ($50 < \text{Hz} < 80$);
- e da una bassa frequenza (> 50 Hz).

Si riporta la tabella riepilogativa delle prime frequenze misurate su ogni singola pedata.

gradino	Rampa 8	Rampa 7	Rampa 6	Rampa 5	Rampa 4	Rampa 3	Rampa 2	Rampa 1
1	72	72	63	68	66	69	95	100
2	41	56	62	68	67	75	86	100
3	62	98	78	69	72	81	97	90
4	62	57	54	77	80	82	97	90
5	54	68	53	76	82	71	83	90
6	101	77	56	76	84	88	84	99
7	70	70	68	81	79	68	100	91
8	69	70	64	82	84	83	100	97
9	70	70	82	81	75	84	101	88
10	98	100	86	70	81	66	71	83
11	70	51	82	110	100	64	81	72
12	56	53	59	80	92	100	90	81
13	80	52	60	88	92	100	90	82
14	46	42	60	88	90	97	89	82
15	46	46	61	90	91	109	88	80
16	36	37	59	66	74	102	90	82
17	52	58	45	65	73	79	90	84
18	70	65	40	66	74	78	100	100
19	76	66	70	75	75	80	99	-
20	104	64	69	105	73	79	78	-

Tabella 1. Risultati sperimentali: prime frequenze misurate (Hz).

In linea di principio, a parità di massa, geometria e sollecitazione, si può affermare che ad una bassa frequenza corrisponde una più ampia vibrazione, che nel caso specifico può essere dovuta alla presenza di difetti o cricche che riducono la rigidità della lastra, o ad una condizione di vincolo più cedevole, ovvero ad una situazione meno confinata (ad esempio dove le pedate non sono a contatto diretto con le sottostanti alzate).

Si considerano quindi critiche le condizioni degli elementi sui quali è stata registrata una bassa frequenza.

Si nota come la maggior parte delle criticità emerse, relative a elementi caratterizzati da una bassa frequenza, si trovano ai piani alti della scala, in particolare nelle rampe n.6, 7 e 8, dove anche visivamente si possono osservare difetti e rotture.

Successivamente alle misurazioni delle frequenze sulle 158 lastre sono state condotte prove

di carico di limitata entità per determinare la deformazione di alcune pedate.

In relazione ai risultati delle frequenze proprie sono stati testati alcuni gradini per ogni famiglia di frequenze. Tre prove sono state condotte su pedate caratterizzate da bassa frequenza, due prove su pedate caratterizzate da media frequenza e due prove su pedate caratterizzate da alta frequenza.



Figura 5. Strumentazione utilizzata per le prove dinamiche.

I risultati delle prove di carico evidenziano chiaramente come esista una diretta correlazione tra la frequenza misurata e la deformazione ottenuta dalla prova. Infatti gli elementi caratterizzati da una alta frequenza (Rampa 1 Gradino 7; Rampa 3 Gradino 13), hanno subito una deformazione limitata, con freccia di abbassamento nell'intorno dello 0,05 mm, mentre gli altri elementi caricati hanno evidenziato una maggiore deformazione, con spostamenti compresi tra 0,11 e 0,26 mm, ovvero da 2 a 5 volte la precedente.

Si riportano nelle figure 7 e 8 due dei grafici che rappresentano gli spostamenti degli elementi sottoposti alle prove di carico.



Figura 6. Strumentazione utilizzata per le prove di carico.

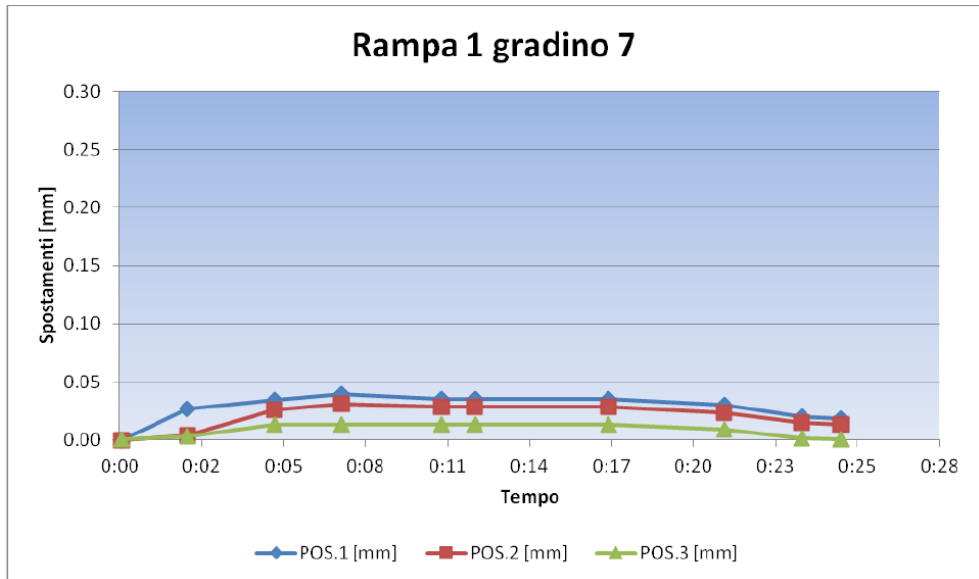


Figura 7. Grafico degli spostamenti della prova di carico sul gradino 7 della rampa 1 (91 Hz).

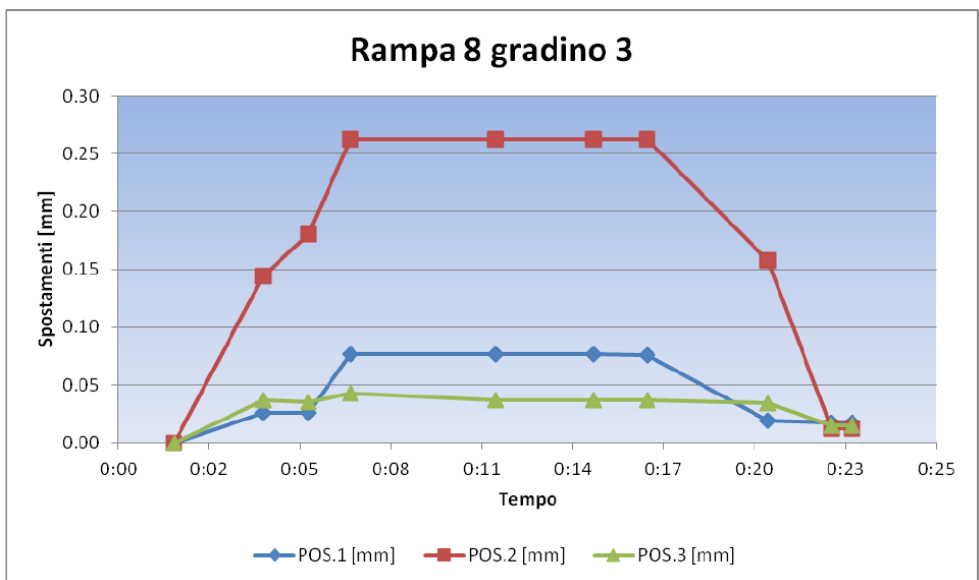


Figura 8. Grafico degli spostamenti della prova di carico sul gradino 3 della rampa 8 (62 Hz).

Da ultimo, nella fase diagnostica, è stato eseguito un saggio ispettivo per la verifica della profondità di incastro delle lastre, a conferma dei dati preliminarmente disponibili.

In particolare è stata eseguita un'indagine endoscopica per l'osservazione e la misura della lunghezza di ammorsamento della lastra in marmo nella muratura.

La prova ha permesso di rilevare un ammorsamento di circa 18 cm, dimensione che consente di ritenere valida l'ipotesi di vincolo di incastro.

Le informazioni acquisite con questa campagna diagnostica permettono di raggiungere un livello di conoscenza "esaustivo" dell'oggetto (livello di conoscenza LC3, come definito nella Tab. C8A.1.2 Circolare 02-02-2009 n. 617/C.S.LL.PP. e D.M. 14-01-2008, NTC2008), consentendo la stesura di un progetto di consolidamento finalizzato alla messa in sicurezza della scala.

Le criticità riscontrate dal primo esame visivo vengono in questo modo confermate e dettagliate, implicando la necessità di un intervento di consolidamento.

5. PROPOSTA DI CONSOLIDAMENTO

Il progetto di consolidamento, di cui si è riscontrata la necessità, verterà sia sul miglioramento del comportamento del singolo gradino, sia sul miglioramento globale del comportamento del sistema rampa.

La proposta progettuale è quella di rendere collaboranti tutti i singoli gradini tra loro.

Il progetto, guidato dal principio del minimo intervento, si pone l'obiettivo di sfruttare le risorse residue del singolo elemento e di incrementarne la capacità grazie alla collaborazione con gli elementi adiacenti, sia quelli posti al di sotto che quelli posti al di sopra, creando un nuovo sistema con una configurazione statica differente, rappresentato dall'elemento rampa e non più da una serie di singoli elementi pedata.

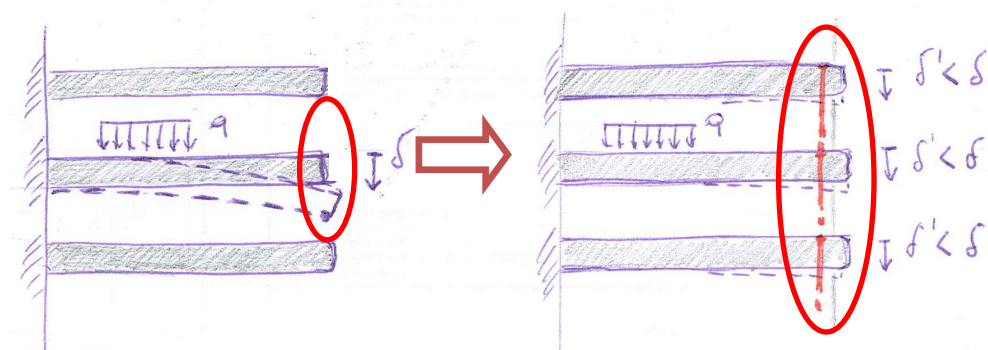


Figura 9. Modifica dello schema statico delle lastre delle pedate: mensole collegate mutuamente.

Il progetto prevede quindi di introdurre alcuni connettori, che chiameremo "spilli" di collegamento, tra le pedate. Questi spilli consistono in barre filettate in acciaio inox o in fibra di vetro di diametro 4 mm, da mettere in opera mediante incollaggio con resina, a seguito

dell'esecuzione di fori di piccolo diametro che interessano due pedate successive passando attraverso l'alzata.

Per facilità operativa i fori per la posa degli spilli verranno eseguiti dalla parte estradossale della pedata e potranno essere successivamente sigillati in modo da essere integrati cromaticamente con il marmo delle pedate. Una lavorazione dall'intradosso comporterebbe infatti l'uso di un ponteggio ingombrante e costoso e una minor sicurezza per gli operatori

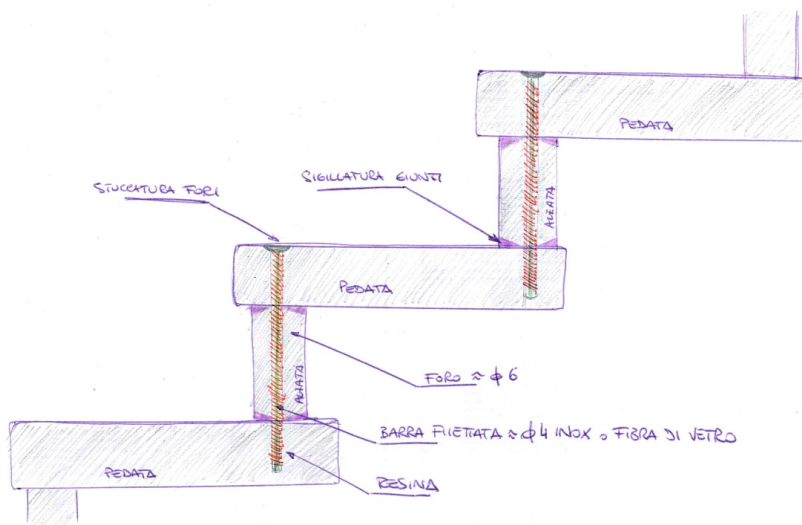


Figura 10. Schema di intervento con posa degli “spilli”.

Ad integrazione dell'intervento proposto, sono state previste altre lavorazioni complementari:

- sigillatura con resina e stuccatura dei giunti tra alzata e pedata, ove separati, in modo da garantire la funzionalità del meccanismo proposto;
- miglioramento dell'ammorsamento tra la ringhiera e le lastre sulle quali trova appoggio. Notiamo infatti che la geometria e la continuità della ringhiera è sfruttabile come risorsa di sicurezza strutturale, ovvero quale elemento di trave su cui le rampe possono trovare un appoggio parziale.

Alla conclusione dell'intervento di consolidamento, il progetto prevede di eseguire una prova di carico estesa a tutti i gradini della scala come verifica della buona esecuzione. La prova di carico potrà essere condotta applicando un carico concentrato mobile su ogni singola pedata, coerentemente con le richieste di normativa, spostandolo di gradino in gradino, per verificare la corretta risposta di tutti gli elementi.

Inoltre verrà condotta una nuova verifica dinamica di conferma del buon esito, dove un'eventuale riposta negativa del singolo elemento potrà essere seguita dall'aggiunta di uno spillo integrativo o di un placcaggio dell'alzata.

BIBLIOGRAFIA

Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.: Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, Proceedings of IMAC 18, San Antonio (TX), USA, 2000.

Fiaschi, A., e altri., Microtremor analysis of the Basilica of the Holy Sepulchre, Jerusalem. In Soil Dyn. Earthq. Eng., 2012.

Giuriani E., *Consolidamento degli edifici storici*, UTET, Torino, 2012.

Gosar A., Determination of masonry building fundamental frequencies in 5 Slovenian towns by microtremor excitation and applications for seismic risk assessment, In Nat. Haz., 2012.

Jurina L., A. A. Bassoli, A. Filaretti, V. E. Mogicato, E. O. Radaelli, D. Rampoldi, Le scale negli edifici storici criteri e tecniche di consolidamento, CIAS - Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico, Lisbona, 22-28 maggio 2016.