

**Tabella 13.** Sintesi dei risultati delle prove eseguite. Resistenza del calcestruzzo [MPa].

| Zona |                              | 1           | 2           | 3           | 5           |
|------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| NDT  | Sclerometro                  | 29.1        | 27.3        | 27.3        | 21.8        |
|      | Ultrasuoni                   | 46.9        | 52.1        | /           | 44.3        |
|      | Sonreb                       | 35.4        | 44.3        | /           | 32.3        |
| MDT  | <i>Pull out</i>              | 48          | 55          | 46          | 48          |
|      | Sonda Windsor <sup>(2)</sup> | 42.3        | 44.9        | 43.8        | 43.3        |
|      | Sonreb-Win                   | 19.6        | 20.6        | /           | 17.9        |
|      | Compressione su carota       | <b>43.4</b> | <b>60.1</b> | <b>48.7</b> | <b>43.0</b> |

Per l'esame dei dati sintetici della tabella 13, si assume che il valore "reale" della resistenza sia costituito dal valore misurato sulla carota estratta. Si osserva che le prove che hanno fornito le migliori approssimazioni sono le stime della resistenza a partire dalle prove ultrasoniche e le prove di *pull out*. Le prove sclerometriche hanno sottostimato sistematicamente la resistenza "reale" del calcestruzzo mentre la sonda Windsor è risultata sostanzialmente insensibile alle variazioni della resistenza del calcestruzzo. La ragione per cui diverse tecniche hanno fornito risultati insoddisfacenti può essere ricercata nella resistenza elevata del calcestruzzo. E' necessario i valori misurati sulle carote sono ricompresi nel raggio d'azione di tutte le tecniche sperimentali impiegate. In particolare, le prestazioni insoddisfacenti dei metodi combinati Sonreb possono essere attribuiti all'elevato valore della velocità ultrasonica. Quando tale velocità si colloca attorno ai 3000 m/s i metodi Sonreb forniscono prestazioni migliori.

La tabella 13 evidenzia come solo un'indagine condotta con più tecniche sperimentali possa fornire una valutazione sull'affidabilità dei risultati. Nel caso specifico, l'uso di diverse tecniche, anche consolidate, avrebbe condotto a gravi errori.

### 5.2 Caratterizzazione della muratura di mattoni pieni di una costruzione storica

L'esempio discusso in queste pagine, figura 36, si riferisce ad una muratura storica di mattoni pieni. Il materiale che segue, prodotto dal Sistema dei Laboratori del DICAT, è ora di dominio pubblico in quanto l'inchiesta della Procura della repubblica di Massa è divenuta di pubblico dominio, insieme a tutto il materiale relativo, a fine giugno 2010.

L'edificio, realizzato nel triennio 1889-1892, venne inaugurato il 12 novembre 1892. La sua storia è piuttosto interessante: venne costruito su progetto dell'Ingegnere capo del Comune, l'Ing. Leandro Caselli, allievo di Alessandro Antonelli, il costruttore della Mole torinese nell'ambito di una vasta campagna di costruzione di opere pubbliche che, a fine ottocento, dotarono la città di significative strutture pubbliche tra cui ponti, scuole, caserme, asili, il palazzo del Comune, il Cimitero Monumentale. Questo edificio costituisce il *trait-d'union* storico tra le costruzioni in muratura e le costruzioni moderne in cemento armato che avrebbero soppiantato, di lì a poco, le strutture a muratura portante. Esso infatti è costituito da una struttura portante in muratura sul perimetro ma all'interno da un'ossatura di pilastri in muratura, archi fortemente ribassati e volte esse pure ribassate, figura 37, che realizzavano in muratura i concetti di pilastro, trave e solaio che ci sono familiari. Si tratta di un curioso ibrido tra una tradizione costruttiva secolare ed una nuova esigenza funzionale che richiedeva spazi liberi sempre più ampi ed una sempre maggiore libertà distributiva interna.



**Figura 36:** Vista dell'edificio.

Gli archi ribassati erano accoppiati a catene che, però, per non condizionare gli spazi sottostanti, non erano collocate al di sotto dell'arco ma nel suo spessore o al di sopra dell'arco, in posizione, quindi, tutt'altro che ottimale. Molte catene sono state ritrovate corrose, altre sono state ritrovate all'interno delle canne fumarie, altre ancora sono caratterizzate da sistemi di connessione, alquanto originali, figura 38.



**Figura 37:** Struttura interna a pilastri, archi ribassati e volte ribassate a formazione di ampi spazi aperti.

Negli anni precedenti il 2008, pare nel periodo 2005-2008, furono eseguiti lavori di ristrutturazione di una parte del complesso edilizio consistiti nella sostituzione di parte degli originari solai voltati con solai latero-cementizi posti a quote in parte diverse da quelle originali, nella ricostruzione di parte delle strutture di copertura con solai latero-cementizi, nonché nella realizzazione di interventi di modifica della distribuzione interna e di posa di nuovi impianti, figura

39. Queste lavori hanno determinato un aumento ed una redistribuzione dei pesi propri rispetto alla situazione originaria, conservata per circa 100 anni.

Contemporaneamente, il cattivo stato di manutenzione consentiva ad ampie parti della costruzione, la cui ristrutturazione era stata abbandonata da diverso tempo, di essere ripetutamente allagata da copiose venute d'acqua piovana.



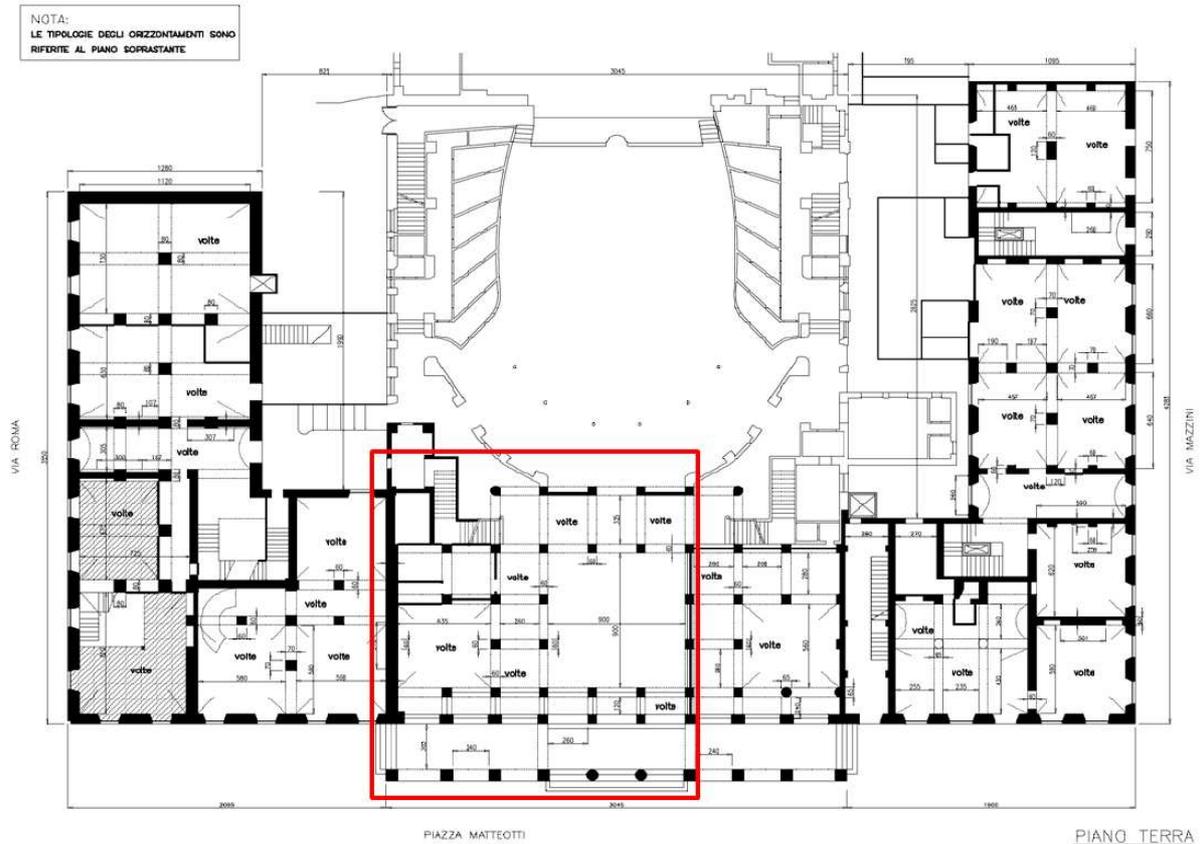
**Figura 38:** Connessione di due tratti di una medesima catena.



**Figura 39:** Crene per impianti nelle pareti di spina dell'edificio.



**Figura 40:** Pilastro in muratura ritrovato collassato la mattina del 25 giugno 2008



**Figura 41:** Localizzazione dell'area d'indagine al piano terreno. La freccia indica il pilastro di figura 40.

Nel giugno 2008 un pilastro in muratura (60x60cm) dell'area biglietteria-foyer, viene ritrovato fessurato verticalmente ed esploso, figure 40 e 41. Dopo un intervento di puntellamento

provvisorio e di cerchiatura del pilastro collassato effettuato dai Vigili del Fuoco, nei mesi successivi collassarono altri 2 pilastri uguali al primo pilastro collassato e che furono rinforzati, anch'essi, con cerchiature metalliche. Nel febbraio 2009 vennero ritrovati diversi altri pilastri murari lesionati da profonde fessure verticali, figura 42, anche se non collassati come il pilastro di figura 40, consolidati provvisoriamente con cerchiature metalliche, figura 43. E' significativo osservare che i pilastri che manifestavano lesioni erano quelli collocati attorno al primo pilastro collassato nel giugno 2008. I pilastri erano tutti lesionati verticalmente, il che fece subito sospettare un collasso a compressione del materiale, meccanismo di collasso che, però, apparve strano in un edificio che per oltre 100 anni non aveva manifestato alcun segno di dissesto. Ne derivò un'ordinanza di sgombero di parte del complesso da parte del Comune e l'avvio di un'inchiesta da parte della Procura della Repubblica competente per territorio.

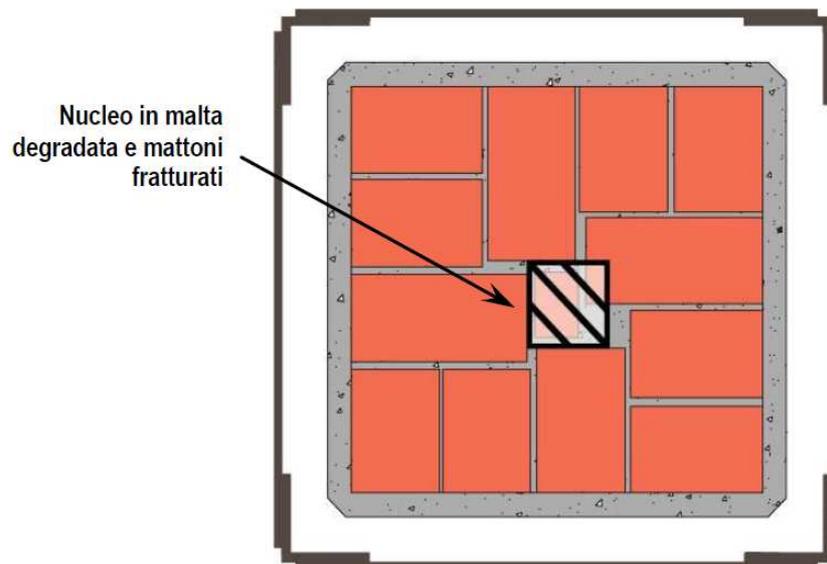


**Figura 42:** Pilastro con profonde lesioni verticali

La ricostruzione della tessitura muraria dei pilastri ha consentito d'individuare la sezione indicata nella figura 42 in cui si evidenzia la presenza di una zona centrale o cava o, comunque, non costituita da muratura. Le dimensioni dei pilastri, 60 x 60cm, la presenza di una cavità interna (o, comunque, di una zona non in muratura), l'ipotesi di collasso per compressione dei pilastri murari imponevano due diverse esigenze: i) la caratterizzazione meccanica della muratura mediante affidabili prove sperimentali; ii) forti limitazioni nella scelta delle tecniche d'indagine sperimentale in quanto se i pilastri erano collassati con la sezione di 60x60cm, ogni prova che potesse ridurre la sezione resistente (carotaggi, martinetti piatti), avrebbe rischiato d'innescare ulteriori e forse più gravi collassi.



**Figura 43:** Pilastri del foyer consolidati con cerchiature metalliche



**Figura 44:** Tessitura dei pilastri e cavità interna.

In particolare, i carotaggi, oltre a ridurre la sezione resistente di un'area pari al 13% della sezione resistente, avrebbero introdotto un'asimmetria geometrica che avrebbe prodotto uno stato tensionale di presso flessione, ben più pericoloso di quello già allo stato limite ultimo presente nei pilastri. I tagli necessari per le prove con martinetti piatti avrebbero sottratto una sezione pari al 30% della sezione resistente complessiva inducendo, per latro, una forte presso-flessione nella sezione. Per altro, il rischio insito nell'asportazione di parte della sezione resistente era evidenziato da un fuori piombo di diversi pilastri pari a 1.2cm su 4m di altezza, che indicava già presente un forte stato di presso-flessione. Entrambe le tecniche MDT, quindi, dovettero essere scartate a priori. Tra le altre considerazioni, vi era la circostanza che, al momento dell'esecuzione delle prove per la caratterizzazione della muratura, solo una piccola parte del complesso edilizio era stata dichiarata inagibile e nella zona interessata dalle prove vi erano ancora diverse unità immobiliari abitate.

Le prove che effettuate furono esclusivamente NDT sui pilastri e MDT su mattoni prelevati dalla struttura. La possibilità di prelevare diversi mattoni dalle murature demolite nel corso delle ristrutturazioni degli anni 2005-2008 ha consentito di ricostruire dei prismi di muratura analoghi a quelli dell'edificio (mattoni prelevati dall'edificio, malte di calce con composizione analoga a quella delle murature esistenti) e provarli direttamente a compressione<sup>1</sup>. Le prove per la caratterizzazione delle murature sono state, quindi:

sui pilastri

- prove soniche
- prove sclerometriche

sui mattoni

- Three Point Bending Tests (resistenza a trazione)
- Prova a compressione diretta

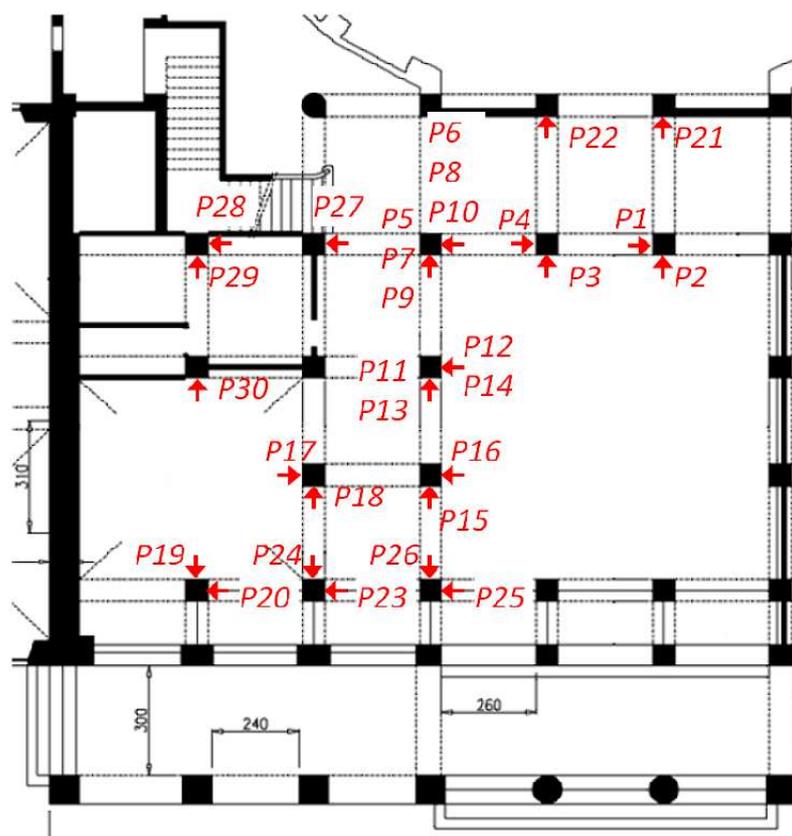
su giunti di malta recuperati da alcune porzioni di muratura

- Punching test (resistenza a compressione della malta)

su assemblaggi di mattoni prelevati in sito e malte analoghe a quelle storiche:

- compressione diretta su prisma di mattoni.

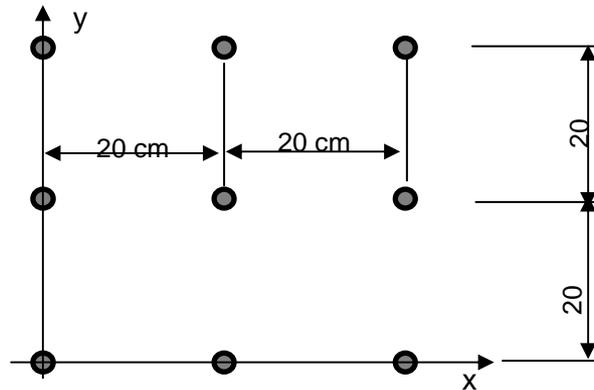
La coerenza dei dati rilevati è stata valutata confrontando i valori sperimentali con consolidate relazioni reperibili nella letteratura scientifica e tecnica sulla resistenza delle murature di mattoni pieni.



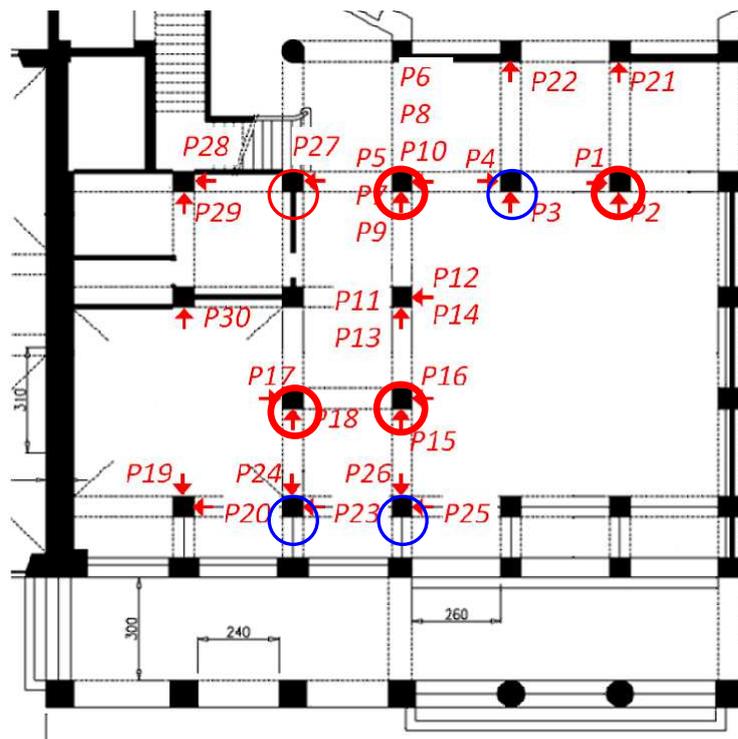
**Figura 45:** Localizzazione dei punti di indagine sulla planimetria del piano terra – dettaglio, cfr. figura 41

<sup>1</sup> Questa parte della caratterizzazione è stata effettuata dal Lab. Ufficiale dei Materiali da Costruzione dell'Univ. di Pisa.

La figura 45 evidenzia i punti di esecuzione delle prove soniche: tutti i punti accessibili dell'atrio monumentale. Obiettivo di quest'indagine era l'individuazione dei pilastri che, presentando minori velocità di propagazione soniche, erano maggiormente danneggiati internamente dalla fessurazioni verticale e, quindi, erano più vicini al collasso. La valutazione della resistenza meccanica a partire dalla velocità di propagazione delle onde soniche, già discutibile per il calcestruzzo, è impossibile per la muratura.



**Figura 46:** Schema di esecuzione delle prove soniche. Ogni cerchio indica una misurazione.



**Figura 47:** Localizzazione dei pilastri con minore velocità sonica al piano terra – dettaglio.

Lo schema di esecuzione delle prove soniche è rappresentato in figura 46; ciascun punto di prova è collocato nella parte centrale di un mattone. La tabella 14 riassume i risultati delle prove soniche e la figura 47 ne fornisce una rappresentazione grafica sintetica. Si osserva che le velocità soniche più basse sono state rilevate nei pilastri adiacenti a quello collassato, particolarmente con velocità tanto più basse quanto più il pilastro è collocato vicino al pilastro collassato di figura 40. Poiché la fessurazioni interna del materiale riduce la velocità sonica, se ne deduce che anche i

pilastrini prossimi a quello collassato sono prossimi al collasso ovvero hanno già raggiunto la propria massima capacità portante.

**Tabella 14.** Risultati delle prove soniche.

| Prova n. | Velocità media [m/s] | Prova n. | Velocità media [m/s] | Prova n. | Velocità media [m/s] |
|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| 1        | <b>1060</b>          | 17       | <b>889</b>           | 31       | 1358                 |
| 3        | 1564                 | 18       | <b>711</b>           | 32       | 1342                 |
| 4        | 1376                 | 20       | 1438                 | 35       | 1633                 |
| 5        | <b>926</b>           | 22       | 1644                 | 41       | 1465                 |
| 6        | <b>807</b>           | 23       | 1372                 | 42       | 2041                 |
| 10       | 1494                 | 25       | 1382                 | 44       | 1393                 |
| 11       | 1765                 | 27       | <b>1223</b>          |          |                      |
| 16       | <b>993</b>           | 30       | 1539                 |          |                      |

**Tabella 15.** Risultati delle prove sclerometriche sui mattoni. Resistenza stimata per la muratura  $f_{cm}$ .

| Prova             | $f_{cm}$ [MPa] | Dev. Std. [MPa] | C.d.V. % | Prova                                       | $f_{cm}$ [MPa] | Dev. Std. [MPa] | C.d.V. % |
|-------------------|----------------|-----------------|----------|---|----------------|-----------------|----------|
| 1, 2              | 3.3            | 0.172           | 5.2%     | 30  | 3.3            | 0.211           | 6.4%     |
| 3, 4              | 2.9            | 0.238           | 8.2%     | 31  | 2.3            | 0.221           | 9.6%     |
| 5, 6, 7, 8, 9, 10 | 3.1            | 0.285           | 9.2%     | 32  | 2.1            | 0.204           | 9.7%     |
| 11, 12, 13, 14    | 3.0            | 0.255           | 8.5%     | 33  | 1.7            | 0.197           | 11.6%    |
| 15, 16            | 2.5            | 0.192           | 7.7%     | 35  | 2.8            | 0.224           | 8.0%     |
| 17, 18            | 2.3            | 0.184           | 8.0%     | 36  | 2.6            | 0.247           | 9.5%     |
| 19, 20            | 2.2            | 0.191           | 8.7%     | 40 m.n.                                     | 4.4            | 0.678           | 15.4%    |
| 21, 22            | 2.4            | 0.211           | 8.8%     | 40 m. v                                     | 1.8            | 0.140           | 7.8%     |
| 23, 24            | 2.3            | 0.182           | 7.9%     | 41  | 2.5            | 0.158           | 6.3%     |
| 25, 26            | 2.5            | 0.190           | 7.6%     | 42  | 8.1            | 0.688           | 8.5%     |
| 27                | 2.4            | 0.168           | 7.0%     | 44  | 1.9            | 0.215           | 11.3%    |
| 28, 29            | 2.4            | 0.226           | 9.4%     | m.n.: muratura nuova m.v.: muratura vecchia |                |                 |          |

**Tabella 16.** Risultati delle prove sclerometriche sulla malta. Resistenza monoassiale a compressione della malta.

| Prova             | $f_{cm}$ [MPa] fig. 13 | Stima qualitativa fig. 12 | Prova     | $f_{cm}$ [MPa] fig. 13 | Stima qualitativa fig. 12 |
|-------------------|------------------------|---------------------------|-----------|------------------------|---------------------------|
| 1, 2              | 2.8                    | mediocre                  | 28, 29    | 2.2                    | mediocre                  |
| 3, 4              | 3.0                    | mediocre                  | 30        | 2.8                    | mediocre                  |
| 5, 6, 7, 8, 9, 10 | 2.8                    | mediocre                  | 31        | 2.6                    | mediocre                  |
| 11, 12, 13, 14    | 2.4                    | mediocre                  | <b>32</b> | <b>3.0</b>             | <b>accettabile</b>        |
| 15, 16            | 2.8                    | mediocre                  | 33        | 2.7                    | mediocre                  |
| 17, 18            | 2.1                    | mediocre                  | <b>35</b> | <b>4.3</b>             | <b>accettabile</b>        |
| 19, 20            | 2.1                    | mediocre                  | <b>36</b> | <b>4.4</b>             | <b>accettabile</b>        |
| 21, 22            | 2.7                    | mediocre                  | 40        | 2.1                    | mediocre                  |
| 23, 24            | 2.1                    | mediocre                  | 41        | 2.0                    | mediocre                  |
| <b>25, 26</b>     | <b>3.4</b>             | <b>accettabile</b>        | 42        | 2.4                    | mediocre                  |
| 27                | 2.1                    | mediocre                  | 44        | 2.2                    | mediocre                  |

**Tabella 17.** *Punching test* sulla malta del V piano. Resistenza a compressione  $f_{cm}$  della malta.

| Campione | Spess. medio [mm] | Spont. a rottura [mm] | Def. a rottura | Carico a rottura [kN] | Resistenza a compressione $f_{cm}$ della malta [MPa] | Durata della prova [s] | Velocità di carico [N/s] |
|----------|-------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|--|------------------------|--------------------------|
| 3 A      | 8                 | 1.04                  | 0.130          | 0.622                 | 0.62   | 4'48"                  | 0.22                     |
| 3 B      | 8                 | 0.53                  | 0.066          | 1.552                 | 1.55   | 5'10"                  | 0.50                     |
| 4        | 8                 | 0.54                  | 0.068          | 1.962                 | 1.96   | 6'20"                  | 0.51                     |
| 5 A      | 13                | 0.51                  | 0.039          | 2.038                 | 2.02   | 6'20"                  | 0.53                     |
| 5 B      | 14                | 0.48                  | 0.034          | 1.867                 | 1.86   | 5'40"                  | 0.55                     |
| 6 A      | 14                | 0.61                  | 0.044          | 2.602                 | 2.60   | 7'42"                  | 0.56                     |
| 6 B      | 8                 | 0.55                  | 0.069          | 2.340                 | 2.34   | 6'55"                  | 0.55                     |
| 10       | 20                | 0.81                  | 0.041          | 1.258                 | 1.26   | 5'25"                  | 0.39                     |

**Tabella 18.** Flessione su tre punti (TPB) sui laterizi del V piano. Resistenza a trazione  $f_{bt}$  del laterizio

| Campione | Carico a rottura [kN] | Resistenza a trazione $f_{bt}$ [MPa] | Variazione di spostamento [mm] | Variazione di carico [kN] | Modulo elastico [MPa] |
|----------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1 A      | 0.974                 | 1.83                                 | 0.202                          | 563                       | 2717                  |
| 1 B      | 0.612                 | 1.29                                 | 0.141                          | 370                       | 2569                  |
| 2 A      | 0.621                 | 1.32                                 | 0.252                          | 398                       | 1539                  |
| 2 B      | 0.549                 | 1.17                                 | 0.177                          | 336                       | 1853                  |
| 3 A      | 1.507                 | 2.97                                 | 0.791                          | 934                       | 1153                  |
| 3 B      | 1.250                 | 2.49                                 | 0.286                          | 794                       | 2714                  |
| 4 A      | 1.303                 | 2.59                                 | 0.127                          | 744                       | 5724                  |
| 4 B      | 1.283                 | 2.55                                 | 0.163                          | 809                       | 4836                  |
| 5        | 0.427                 | 0.94                                 | 0.139                          | 293                       | 2057                  |
| 6 A      | 0.430                 | 0.95                                 | 0.162                          | 295                       | 1781                  |
| 6 B      | 0.521                 | 1.12                                 | 0.154                          | 357                       | 2266                  |
| 7 A      | 1.507                 | 7.13                                 | 0.149                          | 2172                      | 14207                 |
| 7 B      | 3.828                 | 6.93                                 | 0.167                          | 2191                      | 12812                 |
| 8 A      | 0.949                 | 1.92                                 | 0.141                          | 592                       | 4099                  |
| 8 B      | 1.225                 | 2.44                                 | 0.169                          | 774                       | 4467                  |
| 10 A     | 2.869                 | 5.53                                 | 0.238                          | 1763                      | 7233                  |

Le tabelle 15-19 riassumono le prove sclerometriche eseguite sui pilastri (tabella 15) e le prove sui campioni di laterizio, figura 48, e sui giunti di malta (*punching test*, figura 49) prelevati dal V piano dell'edificio e tipologicamente simili a quelli del piano terreno. La tabella 20 ne fornisce un riassunto sintetico.

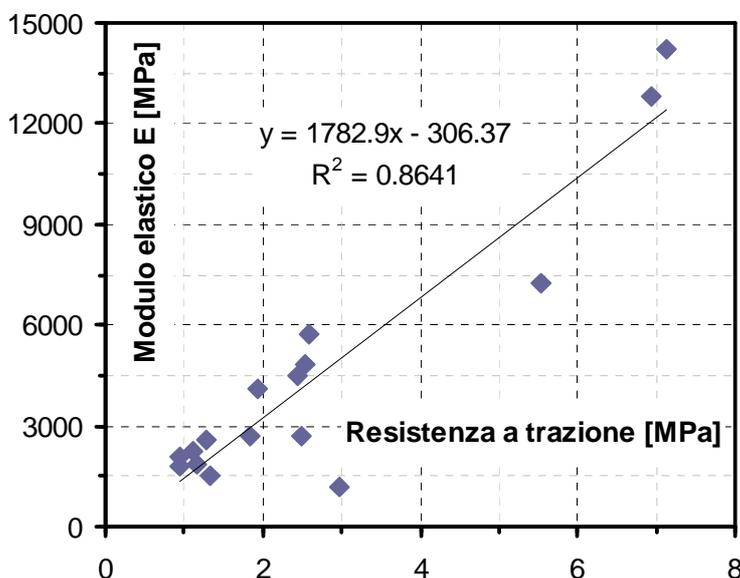
Si osserva che alcune prove sono caratterizzate da una dispersione piuttosto elevata dei risultati, tipica per le murature, particolarmente quelle storiche, mentre altre tecniche, tra cui quella sclerometrica, sono contraddistinte da una dispersione dei dati piuttosto bassa. In zone di muratura evidentemente omogenee, la prova sclerometrica ha manifestato un coefficiente di variazione del 5%, valore che costituisce un primo elemento utile a valutare l'affidabilità della prova sperimentale.

**Tabella 19.** Risultati delle prove di compressione diretta sui laterizi del V piano. Resistenza a compressione  $f_{cb}$

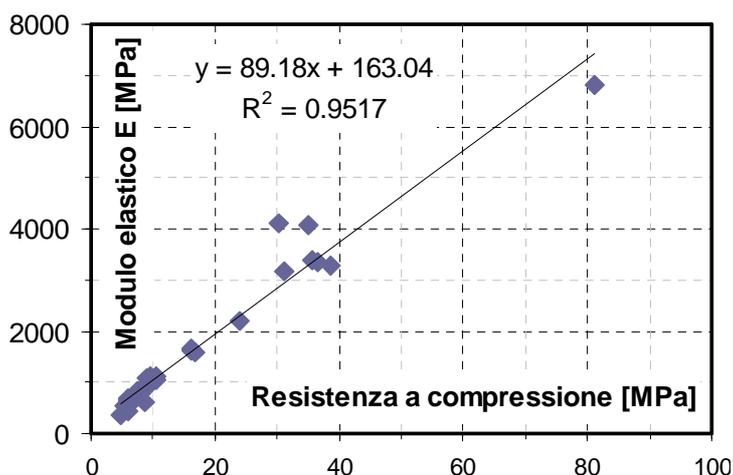
| Campione                     | Carico a rottura [kN] | Resistenza a compressione $f_{bc}$ [MPa]                               | Variazione di spostamento [mm] | Variazione di carico [kN] | Modulo elastico [MPa] |
|------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1A_1                         | 14.4                  | 9.0  | 0.116                          | 5.0                       | 1078                  |
| 1A_2                         | 15.7                  | 9.8  | 0.181                          | 7.5                       | 1036                  |
| 1B_1                         | 11.8                  | 7.4  | 0.150                          | 5.0                       | 833                   |
| 1B_2                         | 9.4                   | 5.9  | 0.186                          | 5.0                       | 672                   |
| <i>Media mattone 1</i>       |                       | <i>8.0</i>   |                                |                           | <i>905</i>            |
| 2A_1                         | 12.7                  | 7.9  | 0.159                          | 5.0                       | 786                   |
| 2A_2                         | 8.7                   | 5.4  | 0.119                          | 2.5                       | 525                   |
| 2B_1                         | 11.0                  | 6.9  | 0.187                          | 5.0                       | 668                   |
| 2B_2                         | 7.5                   | 4.7  | 0.179                          | 2.5                       | 349                   |
| <i>Media mattone 2</i>       |                       | <i>6.2</i>   |                                |                           | <i>582</i>            |
| 3A_1                         | 26.6                  | 16.6   | 0.195                          | 12.5                      | 1603                  |
| 3B_1                         | 14.1                  | 8.8  | 0.200                          | 5.0                       | 625                   |
| <i>Media mattone 3</i>       |                       | <i>12.7</i>  |                                |                           | <i>1114</i>           |
| 4A_1                         | 26.1                  | 16.3   | 0.188                          | 12.5                      | 1662                  |
| 4A_2                         | 25.7                  | 16.1   | 0.192                          | 12.5                      | 1628                  |
| 4B_1                         | 38.3                  | 23.9   | 0.228                          | 20.0                      | 2193                  |
| <i>Media mattone 4</i>       |                       | <i>25.9</i>  |                                |                           | <i>1828</i>           |
| 5_1                          | 14.9                  | 9.3  | 0.131                          | 5.0                       | 954                   |
| 5_2                          | 9.8                   | 6.1  | 0.301                          | 5.0                       | 415                   |
| <i>Media mattone 5</i>       |                       | <i>7.7</i>   |                                |                           | <i>685</i>            |
| 6A_1                         | 14.3                  | 8.9  | 0.130                          | 5.0                       | 962                   |
| 6A_2                         | 9.8                   | 6.1  | 0.194                          | 5.0                       | 644                   |
| 6B_1                         | 16.7                  | 10.4   | 0.180                          | 7.5                       | 1042                  |
| <i>Media mattone 6</i>       |                       | <i>8.5</i>   |                                |                           | <i>883</i>            |
| 7A_1                         | 62.0                  | 38.8   | 0.266                          | 35.0                      | 3289                  |
| 7A_2                         | 57.2                  | 35.8   | 0.241                          | 32.5                      | 3371                  |
| 7B_1                         | 48.4                  | 30.3   | 0.167                          | 27.5                      | 4117                  |
| 7B_2                         | 56.1                  | 35.1   | 0.184                          | 30.0                      | 4076                  |
| <i>Media mattone 7</i>       |                       | <i>35.0</i>  |                                |                           | <i>3713</i>           |
| 8A_1                         | 11.2                  | 7.0  | 0.196                          | 5.0                       | 638                   |
| 8A_2                         | 15.1                  | 9.4  | 0.122                          | 5.0                       | 1025                  |
| 8B_1                         | 15.5                  | 9.7  | 0.112                          | 5.0                       | 1116                  |
| 8B_2                         | 16.8                  | 10.5   | 0.168                          | 7.5                       | 1116                  |
| <i>Media mattone 8</i>       |                       | <i>9.2</i>   |                                |                           | <i>974</i>            |
| 10A_1+                       | 130.0*                | 81.3   | 0.257                          | 70.0                      | 6809                  |
| 10A_2+                       | 50.0                  | 31.3   | 0.157                          | 20.0                      | 3185                  |
| 10B+                         | 58.5                  | 36.6   | 0.223                          | 30.0                      | 3363                  |
| <i>Media mattone 10</i>      |                       | <i>33.9</i>  |                                |                           | <i>4452</i>           |
| <i>* escluso dalla media</i> |                       | <i>+ rottura esplosiva, mattone in prossimità di una canna fumaria</i> |                                |                           |                       |

Le prove eseguite hanno consentito di stimare, sulla base di una buona quantità di dati, la resistenza dei singoli componenti della muratura, mattoni e malta, e le relative caratteristiche elastiche. La resistenza della muratura è stata stimata unicamente tramite la prova sclerometrica che è affetta intrinsecamente da un'affidabilità inferiore rispetto ad altre prove e, inoltre, è una prova ancora a carattere sperimentale codificata solo nella normativa ferroviaria europea UIC 778-3R. Per stimare la resistenza a compressione della muratura di mattoni pieni si è proceduto con altre due strade concomitanti: i) prove su prismi di muratura ricostruita, analoga a quella esistente,

ottenuta con l'impiego di mattoni recuperati dai piani superiori dell'edificio e con malte di composizione chimica e granulometrica il più possibile simile a quella delle muratura dell'edificio; ii) ricorrendo a stime della resistenza della muratura a partire dalle resistenze dei suoi componenti (malta e mattone), con le relazioni teoriche fornite da UIC 778-3R, Eurocodice 6 e D.M. 14.1.2008.



**Figura 48:** Correlazione tra il modulo elastico e la resistenza a trazione del laterizio.



**Figura 49:** Correlazione tra il modulo elastico la resistenza a compressione del laterizio.

**Tabella 20.** Riassunto sintetico delle prove eseguite sulla muratura e sui singoli elementi costituenti.

| Prova                             | Sonica                             | Sclerometrica mattoni | Flessione su tre punti TPBT | Compressione diretta      | Punching test             |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Materiale</b>                  | Muratura                           | Muratura              | Mattone                     | Mattone                   | Malta                     |
| <b>Caratteristica stimata</b>     | Velocità sonica                    | Resistenza muratura   | Resistenza a trazione       | Resistenza a compressione | Resistenza a compressione |
| <b>Valori</b>                     | 800-1200<br>1200-1400<br>1400-1700 | 2.1-2.9               | 1.0-2.6                     | 6.0-13.0                  | 1.2-2.3                   |
| <b>Coefficiente di variazione</b> | 20-30%                             | 15%                   | 35%                         | 5-30%                     | 30%                       |



**Figura 48:** prove sui laterizi della muratura. A SN: prova di flessione su tre punti, a DX prova di compressione diretta.



**Figura 49:** punching test sui giunti di malta. A DX il setup di prova, a SN il dettaglio della prova

La resistenza dei mattoni  $f_b$  misurata (6-9MPa) è risultata nettamente inferiore a quanto la documentazione tecnica dell'epoca riferisce per le strutture progettate e costruite dall'Ing. Caselli (15MPa). Nelle stime della resistenza della muratura si considerano i due casi di mattone con resistenza pari a 6 e 9 MPa. La tabella 21 riassume le diverse stime della resistenza della muratura ottenute con i diversi metodi.

**Tabella 21.** Resistenza della muratura stimata sulla base di diversi approcci.

| Prova  | Sclerometrica | Prismi ricostruiti | D.M. 14.1.2008            | UIC 778-3R                | Eurocodice 6              |
|--|---------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Resistenza a compressione stimata MPa</b> | 2.1-2.9       | 2.8, 4.2           | 3.2 ( $f_b=6\text{MPa}$ ) | 1.5 ( $f_b=6\text{MPa}$ ) | 2.1 ( $f_b=6\text{MPa}$ ) |
|  | <2.5>         |                    | 3.9 ( $f_b=9\text{MPa}$ ) | 2.0 ( $f_b=9\text{MPa}$ ) | 2.8 ( $f_b=9\text{MPa}$ ) |

La tabella 21 evidenzia come vi sia un buon accordo tra le diverse stime della resistenza della muratura che, complessivamente, nonostante le fonti d'incertezza, può essere valutata nell'intervallo 2.5-3.0MPa. E' necessario precisare che la variabilità dei dati sperimentali è dovuta, in parte, alla disomogeneità del materiale: prove su pilastri diversi forniscono risultati diversi anche perché il materiale è necessariamente diverso.

Questo esempio di applicazione di tecniche NDT e MDT dimostra come la stima della resistenza di un materiale, ancorché si tratti di una muratura storica di mattoni pieni, deve discendere da un'analisi comparata dei risultati di diverse prove sperimentali. Nessuna prova, individualmente, è in grado di fornire indicazioni di riferimento conclusive né una valutazione dell'affidabilità della stima effettuata.

A completamento della discussione di questo caso studio: un'attenta e dettagliata analisi dei carichi ha consentito di accertare che il carico sui pilastri del piano terreno era tale da produrre una tensione media (carico perfettamente centrato) di compressione compresi nell'intervallo 1.1-2.8 MPa, valori che salgono a 1.3-3.5MPa quando si tenga conto delle eccentricità misurate sui diversi pilastri. Il confronto di queste tensioni con le stime di resistenza della muratura riassunte nella tabella 21 forniscono la spiegazione del fenomeno evidenziato nella figura 40.

### **Riferimenti bibliografici**

#### Riferimenti tecnico-scientifici

- Arioğlu E., Köylüoğlu O., 1996. *Discussion of prediction of concrete strength by destructive methods by Ramyar and Kol. Cem., Concr. World 3, Turkish.*
- Bocca P., Cianfrone S., 1983. *Le prove non distruttive sulle costruzioni: una metodologia combinata.* L'Industria Italiana del Cemento, 6, 429-436.
- Del Monte E, Lavacchini G., Vignoli A, 2004. *Modelli per la previsione della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera.* Ingegneria Sismica anno XXI n°3.
- Di Leo A., Pascale G., 1994. *Prove non distruttive per l'affidabilità e la sicurezza delle strutture civili,* Bologna SAIE 1994.
- Gašparik J., 1992. *Prove non distruttive in edilizia.* Quaderno didattico A.I.P.N.D., Brescia.
- Giachetti R., Lacquaniti L., 1980. *Controlli non distruttivi su impalcati da ponte in cemento armato.* Nota Tecnica 04, Università degli studi di Ancona – Facoltà di Ingegneria.
- Masi A., *La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive, //* *Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio e Diagnostica, 1/2005.*
- Massacesi M., Menditto G., (2002). „Modifiche all'attuale sclerometro tipo N e realizzazione di nuove curve di correlazione tra gli indici sclerometrici e la resistenza meccanica a compressione dei conglomerati non strutturali, ordinari, ad alte prestazioni ed alte resistenze e nuova formulazione del metodo combinato”, Rapporto Eurosit.
- Pauser A., Ö.B.B., (2004). "Circular masonry arch bridges", Austrian Federal Railways – Infrastructure, Wien, Internal report.
- Puccinotti R., *Durezza degli inerti e metodo Windsor,* Atti di PnD Milano 2007, Milano, 11-13 ottobre 2007.
- Puccinotti R., D'Elia A., De Lorenzo R., *I metodi combinati a più parametri nella stima della resistenza a compressione del calcestruzzo,* Atti di PnD Milano 2007, Milano, 11-13 ottobre 2007.
- Pascale G., 1993. *Sperimentazione su calcestruzzo e sonda Windsor,* Atti Seminario AICAP, Venezia.
- Schmidt E., 1951. *Versuche mit dem neuen Beton-Prüfhammer zur Qualitätsbestimmung des Betons.* Schweiz. Arch. Angew. Wiss. Tech. Vol. 17 n°5.
- Zocca A., Di Lena M., (1986). "I controlli non distruttivi e la valutazione della resistenza dei calcestruzzi in opera", Istituto Sperimentale FS.

#### Riferimenti normativi

- UNI 9189 "Calcestruzzo indurito. Determinazione dell'indice sclerometrico"
- UNI EN 12504-2-2001. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Determinazione dell'indice sclerometrico*
- UNI EN 583-2004. *Prove non distruttive. Esame ad ultrasuoni*
- UNI EN 12504-4-2005: *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.*
- UNI 10157/1992, *Calcestruzzo indurito,. Determinazione della forza di estrazione mediante inserti post-inseriti ad espansione geometrica forzata*
- UNI EN 12504-3-2005. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: determinazione della forza di estrazione.*
- Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive - Servizio Tecnico Centrale del Cons. Sup. Lavv. Pubbl., febbraio 2008*
- ASTM C803/C803M - 03 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete