

POLITECNICO DI MILANO
FACOLTÀ DI ARCHITETTURA E SOCIETÀ

Corso di laurea specialistica in Architettura



SUL CONTROLLO DELLA FESSURAZIONE
NELLE STRUTTURE CIVILI

Tesi di laurea di: **Francesco BIANCONI** **Matricola 711949**

Relatore: **Prof. Roberto FELICETTI**

Correlatori: **Arch. Giuliana CARDANI**
 Ing. Marco LAMPERTI

Anno accademico 2008-2009

Sul controllo della fessurazione nelle strutture civili

Indice

INTRODUZIONE	pag. 1
1_I FENOMENI DI FESSURAZIONE	pag. 3
1.1_Classificazione delle fessure, delle loro fasi e delle loro leggi di progressione.....	pag. 4
1.1.1_Nomenclatura delle diverse parti di una fessura tipo.....	pag. 4
1.1.2_Le fasi fessurative.....	pag. 5
1.1.3_Le varie specie di progressione.....	pag. 7
1.2_Le cause perturbatrici, i dissesti elementari e le fessure attese nei solidi fragili.....	pag. 9
1.2.1_Cedimenti fondali.....	pag. 10
1.2.1.1_Traslazione orizzontale longitudinale relativa.....	pag. 11
1.2.1.2_Traslazione orizzontale trasversale relativa: cedimenti corti.....	pag. 12
1.2.1.3_Traslazione orizzontale trasversale relativa: cedimenti lunghi.....	pag. 12
1.2.1.4_Traslazione verticale assoluta di un solido contiguo ad uno in posto.....	pag. 13
1.2.1.5_Traslazione verticale relativa terminale: cedimenti corti.....	pag. 14
1.2.1.6_Traslazione verticale relativa terminale: cedimenti lunghi.....	pag. 15
1.2.1.7_Traslazione verticale relativa intermedia: cedimenti lunghi, medi e corti.....	pag. 15
1.2.1.8_Rotazione intorno ad un asse trasversale.....	pag. 16
1.2.2_Cedimenti delle strutture murarie.....	pag. 17
1.2.2.1_Schiacciamento per carichi localizzati.....	pag. 18
1.2.2.2_Schiacciamento per peso proprio.....	pag. 19
1.2.2.3_Inflessione per pressoflessione.....	pag. 20
1.2.2.4_Fenomeni vibratorii su fessura esistente.....	pag. 20
1.2.2.5_Moti ondulatorii longitudinali.....	pag. 21
1.2.3_Variazioni termiche ed igrometriche.....	pag. 22
1.3_Le caratteristiche specifiche delle fessure sulle diverse tipologie strutturali.....	pag. 24
1.4_Formulazione di una prima diagnosi.....	pag. 30
1.4.1_Primi accertamenti.....	pag. 30
1.4.2_Dissesti non immediatamente identificabili.....	pag. 31
1.4.3_Fessurazioni recenti e non recenti.....	pag. 33

1.4.4_Discussione.....	pag. 33
1.4.5_Necessità di intervento o progetto di monitoraggio.....	pag. 34
1.4.6_Relazione tecnica conclusiva.....	pag. 35
2_IL MONITORAGGIO STATICO	pag. 37
2.1_Introduzione.....	pag. 38
2.1.1_Strumentazione e sistemi di processamento dei dati.....	pag. 42
2.1.1.1_Movimenti delle fessure.....	pag. 42
2.1.1.2_Movimenti relativi delle strutture verticali.....	pag. 43
2.1.1.3_Movimenti orizzontali assoluti.....	pag. 43
2.1.1.4_Assesamenti differenziali.....	pag. 44
2.1.1.5_Condizioni ambientali.....	pag. 44
2.1.1.6_Acquisizione dei dati e sistemi di processamento.....	pag. 45
2.2_I metodi consolidati di misurazione del monitoraggio statico delle fessure.....	pag. 46
2.2.1_Spie di gesso, segnali di cuspidi e di ventre.....	pag. 46
2.2.2_Righelli graduati.....	pag. 48
2.2.2.1_Fessurimetro piano.....	pag. 49
2.2.2.2_Fessurimetro angolare.....	pag. 50
2.2.2.3_Fessurimetro per pavimenti.....	pag. 50
2.2.2.4_Fessurimetro per dislivelli.....	pag. 51
2.2.3_Comparatori.....	pag. 52
2.2.3.1_Comparatore a quadrante.....	pag. 53
2.2.3.2_Comparatore digitale.....	pag. 54
2.2.3.3_Comparatori a tasto orientabile.....	pag. 55
2.2.3.4_Deformometri meccanici.....	pag. 56
2.2.3.5_Un particolare esempio di utilizzo di un deformometro meccanico insieme con tre basette disposte a triangolo equilatero.....	pag. 61
2.2.4_Trasduttori.....	pag. 63
2.2.4.1_Trasduttori di spostamento potenziometrici.....	pag. 64
2.2.4.2_Trasduttori di spostamento capacitivi.....	pag. 65
2.2.4.3_Trasduttori di spostamento induttivo.....	pag. 66
2.2.4.4_Encoder tachimetrico.....	pag. 67
2.2.4.5_Encoder incrementale.....	pag. 68

2.2.4.6_ Encoder assoluto.....	pag. 69
2.3_ Un caso esempio: il Torrazzo di Cremona.....	pag. 70
2.3.1_ Descrizione dell’edificio.....	pag. 70
2.3.2_ Introduzione al recente progetto di monitoraggio.....	pag. 71
2.3.3_ Descrizione del sistema di monitoraggio.....	pag. 72
2.3.3.1_ Il sistema di acquisizione.....	pag. 72
2.3.3.2_ Il sistema di misura per i segnali lenti.....	pag. 75
2.3.3.3_ Trasduttori di spostamento LVDT.....	pag. 75
2.3.3.4_ Trasduttori di temperatura RTD.....	pag. 77
2.3.3.5_ Telecoordinometro.....	pag. 79
2.3.3.6_ Il sistema di misura per i segnali veloci.....	pag. 80
2.3.3.7_ Anemometri e bandierine segnamento.....	pag. 80
2.3.3.8_ Servoaccelerometri.....	pag. 81
3_ I METODI DI MISURAZIONE OGGETTO DI SVILUPPO	pag. 85
3.1_ I fessurimetri moiré.....	pag. 86
3.1.1_ L’effetto moiré.....	pag. 86
3.1.2_ Il funzionamento del calibro a nonio.....	pag. 88
3.1.3_ Moiré TellTales.....	pag. 93
3.1.4_ L’analisi delle frange moiré in retini di cerchi concentrici.....	pag. 98
3.1.5_ Il programma di elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré.....	pag. 108
3.2_ Metodo dell’analisi delle immagini digitali.....	pag. 111
3.2.1_ La fase di preparazione ed acquisizione dei fotogrammi.....	pag. 111
3.2.2_ La fase di analisi informatica dei fotogrammi acquisiti.....	pag. 116
4_ VERIFICHE IN LABORATORIO SULL'ACCURATEZZA DEI METODI DI MISURAZIONE	pag. 121
4.1_ Introduzione.....	pag. 122
4.1.1_ Preparazione alla prova in laboratorio.....	pag. 123
4.2_ Misure con i trasduttori induttivi.....	pag. 129
4.3_ Misure con il deformometro meccanico.....	pag. 136
4.3.1_ La fase di acquisizione dei dati.....	pag. 140

4.3.2_ Interpretazione dei dati e conclusioni.....	pag. 142
4.3.3_Verifica aggiuntiva del deformometro utilizzato nella prova.....	pag. 144
4.4_Misure con i fessurimetri piani.....	pag. 151
4.4.1_ Interpretazione dei dati e conclusioni.....	pag. 156
4.5_Misure con i fessurimetri moiré.....	pag. 159
4.5.1_La fase di acquisizione dei fotogrammi.....	pag. 163
4.5.2_ Elaborazione dei fotogrammi e interpretazione dei dati	pag. 171
4.6_Analisi delle immagini.....	pag. 175
4.6.1_La fase di elaborazione dei fotogrammi e di gestione dei dati.....	pag. 178
4.6.2_ Interpretazione dei dati e conclusioni.....	pag. 185
4.7_Conclusioni sulle verifiche svolte in laboratorio.....	pag. 186
5_CONFONTO TRA I METODI DI MISURAZIONE TRAMITE VERIFICHE <i>IN SITU</i> AD ARCISATE ...	pag. 191
5.1_La torre campanaria di S.Vittore ad Arcisate.....	pag. 192
5.2_Descrizione del monitoraggio in corso.....	pag. 195
5.3_La prova sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate.....	pag. 198
5.3.1_ Il primo sopralluogo sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate e la preparazione degli strumenti di misurazione.....	pag. 202
5.3.2_ Il secondo sopralluogo sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate e la descrizione della campagna di misure.....	pag. 221
5.3.2.1_ I valori ottenuti con i trasduttori potenziometrici.....	pag. 225
5.3.2.2_ I valori delle letture con i deformometri meccanici.....	pag. 227
5.3.2.3_ I valori ricavati dall'analisi dei fessurimetri moiré.....	pag. 229
5.3.2.4_ I valori ricavati dall'analisi delle immagini.....	pag. 230
5.4_Conclusioni sulle verifiche ad Arcisate.....	pag. 232
6_CONCLUSIONI	pag. 237
BIBLIOGRAFIA	pag. 245

Indice delle figure

1_I FENOMENI DI FESSURAZIONE

1 – Individuazione delle parti fondamentali di una fessura tipo.....	pag. 4
2 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione orizzontale longitudinale relativa.....	pag. 11
3 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione trasversale relativa di una porzione corta del solido.....	pag. 12
4 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione trasversale relativa di una porzione lunga del solido.....	pag. 13
5 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione verticale assoluta di un solido contiguo ad uno in posto.....	pag. 14
6 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione verticale terminale relativa di una porzione corta del solido.....	pag. 14
7 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione verticale relativa di una porzione lunga del solido.....	pag. 15
8 e 9 – Schizzi che schematizzano le fessure attese nel caso di traslazione verticale relativa di una porzione lunga, media (a sinistra) o corta del solido (a destra).....	pag. 16
10 - Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di rotazione di una porzione intorno ad un asse trasversale.....	pag. 17
11 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di schiacciamento del solido a causa di carichi localizzati.....	pag. 18
12 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di schiacciamento del solido a causa del proprio peso.....	pag. 19
13 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di inflessione per pressoflessione.....	pag. 20
14 – Schizzo che schematizza l'andamento atteso di una fessura esistente nel caso di fenomeni vibratorii trasversali...	pag. 21
15 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di moti ondulatorii longitudinali (terremoto).....	pag. 21
16 – Schizzo che schematizza il possibile progresso di una fessura esistente su un solido nel caso di variazioni termiche e igrometriche.....	pag. 23
17 – Soluzioni di continuità e distacchi dello strato di finitura di un paramento esterno.....	pag. 25
18 e 19 – Fenomeni di fessurazione verticale del solo strato di intonaco in corrispondenza di un pilastro.....	pag. 26
20 e 21 – Una grande fessura nella zona di contatto tra il corpo in posto ed il corpo che sta cedendo	pag. 26
22 e 23 – Due esempi di fessure su murature portanti. A sinistra tutto il piano della facciata tende a distaccarsi dal resto dell'edificio. A destra una fessura causata dal peso proprio (andamento verticale) e che si sviluppa nelle zone deboli come la malta.....	pag. 27
24 e 25 – Due esempi di fessure su murature portanti. A sinistra si può notare come la fessura abbia spaccato per primo il mattone. A destra invece un caso in cui il quadro fessurativo interessa quasi esclusivamente i giunti di malta.....	pag. 28
26 e 27 – Due esempi di fessure su elementi strutturali in calcestruzzo armato. A sinistra un pilastro di una grande struttura fessurato e vicino al collasso. A destra una trave (armatura in cannuce di legno) inflessa a causa dell'eccessivo sforzo a flessione si è fessurata ed espelle la sua porzione più esterna.....	pag. 29

28 – Una trave in legno inflessa e fessurata. E' stata posta una stampella di appoggio poco prima del suo molto probabile collasso.....	pag. 29
29 – Primi accertamenti in sito.....	pag. 30
30 – Esempio di elaborato di sintesi di un rilievo materico.....	pag. 31
31 e 32 – Esempi di elaborati di sintesi di un rilievo del quadro fessurativo (a sinistra) e di un rilievo del degrado (a destra).....	pag. 32
33 – Esempio di grafici di sintesi di prove soniche effettuate in sito.....	pag. 33
34 – Esempio di intervento repentino di messa in sicurezza.....	pag. 34

2_IL MONITORAGGIO STATICO

35 – Esempio di intervento preliminare di messa in sicurezza di un edificio pericolante.....	pag. 38
36 e 37 – A sinistra un esempio di strumenti per il monitoraggio dinamico (accelerometri). A destra un esempio di strumento per il monitoraggio statico (trasduttore potenziometrico).....	pag. 39
38 – Due computer per il sistema di acquisizione dei dati dinamici e statici in sito.....	pag. 39
39 – Esempio di lettura manuale eseguita con uno strumento removibile (deformometro meccanico digitale).....	pag. 40
40 e 41 – Un comparatore meccanico a quadrante e la sua applicazione sul campo.....	pag. 43
42 e 43 – Un estensometro meccanico a base lunga ed il suo utilizzo in sito.....	pag. 44
44 – Schema esemplificativo di un sistema automatico di acquisizione dei dati e di processamento degli stessi (Cattedrale di Noto, 1996).....	pag. 45
45 e 46 – Schema della corretta applicazione di una spia (a sinistra). Esempio reale di una spia di malta a spessore di intonaco (a destra).....	pag. 46
47 e 48 – Schema della corretta posizione dove fare i segnali di cuspidi (a sinistra) ed i segnali di ventre (a destra).....	pag. 48
49 – Un set di tutti i righelli graduati disponibili.....	pag. 48
50, 51 e 52 – Un fessurimetro piano applicato (a sinistra). A destra due immagini dei retini millimetrati grazie ai quali avviene la lettura (in alto spostamento nullo; in basso spostamento di 4 mm verso destra).....	pag. 49
53 – Esempio di fessurimetri angolari.....	pag. 50
54 – Un esempio di fessurimetro per pavimenti.....	pag. 51
55 – Un esempio di fessurimetro per dislivelli.....	pag. 51
56 – Un comparatore meccanico e gli strumenti accessori.....	pag. 52
57 – Un comparatore meccanico a quadrante.....	pag. 53
58 – Un comparatore meccanico digitale.....	pag. 54
59 – Un comparatore meccanico a tasto orientabile.....	pag. 55
60 – Il deformometro meccanico Huggenberger serie EDU (base 250 mm) ed i suoi accessori.....	pag. 56
61 – Schema dell'innesto della punta del tastatore (a sfera) di un deformometro meccanico nella concavità di una basetta.....	pag. 57
62 e 63 – La dima di posizionamento e le basette nella fase di incollaggio.....	pag. 58
64 – Una lettura con il deformometro Huggenberger serie EDU (base 250 mm).....	pag. 58
65 – Tutti gli strumenti presenti nella valigetta di un deformometro Huggenberger serie EDU II (base 250 mm).....	pag. 59
66 e 67 – A sinistra un deformometro a leverismi. A destra un deformometro a cursore.....	pag. 60

68 e 69 – A sinistra un deformometro con punte e perni allineati. A destra i perni sono più esterni delle punte e si potrebbero generare delle coppie di forze e, di conseguenza, delle flessioni sull'asta.....	pag. 60
70 e 71 – Schematizzazione del metodo del triangolo equilatero per la lettura degli spostamenti. Nell'immagine a sinistra (a) viene rappresentato il caso di apertura della fessura perpendicolare al suo andamento principale. L'immagine a destra (b) invece rappresenta il caso di scorrimento parallelo di una delle due parti. Il colore verde sta per una misura che si va amplificando nel tempo, mentre il colore rosso sta per una misura che tende a ridursi.....	pag. 61
72 – Schema riassuntivo del procedimento per ottenere le informazioni sugli spostamenti che interessano la fessura monitorata. A', B' e C' fanno riferimento al triangolo una volta che è stato deformato dai movimenti della fessura.....	pag. 62
73 – Schema del funzionamento di un trasduttore di spostamento potenziometrico.....	pag. 64
74 – Schema del funzionamento di un trasduttore di spostamento capacitivo a superficie variabile.....	pag. 65
75 e 76 – Schemi del funzionamento di un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT).....	pag. 66
77 e 78 – Un encoder tachimetrico e lo schema del suo funzionamento.....	pag. 67
79 – Schema del funzionamento di un encoder incrementale.....	pag. 68
80 – Schema per la determinazione del verso di rotazione di un encoder incrementale.....	pag. 68
81 – Disco di un encoder assoluto con dati in codice Gray.....	pag. 69
82 – Vista notturna del Duomo di Cremona e del Torrazzo oggi.....	pag. 70
83 – Il Torrazzo di Cremona ed il suo quadro fessurativo.....	pag. 71
84 – Schema dell'organizzazione del sistema di acquisizione sul Torrazzo di Cremona.....	pag. 73
85 – Centralina di acquisizione dei dati statici e dinamici.....	pag. 74
86, 87 e 88 – Trasduttori induttivi di spostamento (LVDT) prima dell'applicazione, durante l'applicazione (in basso a sinistra) ed una volta in funzione (a destra).....	pag. 75
89 – Una termoresistenza RTD modello PT 100.....	pag. 78
90 – Un anemometro a coppe.....	pag. 82
91 – Localizzazione dei servoaccelerometri.....	pag. 83
92 – Un servoaccelerometro applicato sul Torrazzo.....	pag. 84

3_I METODI DI MISURAZIONE OGGETTO DI SVILUPPO

93 – Un disegno di interferenza moiré generato dall'intersezione di due griglie di linee nere parallele, dove una è leggermente ruotata rispetto all'altra.....	pag. 86
94 e 95 – A sinistra l'effetto moiré distorce molto l'immagine digitale. A destra la stessa immagine una volta corretta.....	pag. 87
96 – Un calibro a nonio.....	pag. 88
97 – Disegno schematico di un calibro a nonio con individuati i suoi componenti fondamentali.....	pag. 88
98 – Particolare del nonio di un calibro.....	pag. 89
99 – Schematizzazione dei differenti passi delle tacche di un nonio (in basso) e dell'asta graduata (in alto).....	pag. 89

100 – Schematizzazione della lettura di alcune misure tipo attraverso il calibro a nonio. In ordine vengono rappresentati le seguenti misure: 0,1 mm; 0,2 mm; 1 mm; 7,4 mm.....	pag. 90
101 – Sovrapposizione di due retini di righe nere e bianche a passo leggermente diverso. Si può notare come si formino dei disegni di interferenza. Il confronto tra due retini divisi in maniera leggermente diversa sta alla base del funzionamento sia del calibro a nonio che del fessurimetro moirè. Per piccoli spostamenti di un retino le frange di interferenza subiscono degli spostamenti più evidenti.....	pag. 91
102 – Rotazione dei due passi di nonio e asta graduata pensati come se si alternassero una serie di neri e bianchi. L'immagine che ne risulta è molto simile al disegno di interferenza generato dai due retini del fessurimetro moiré.....	pag. 92
103 – Un fessurimetro moiré.....	pag. 93
104 e 105 – Ingrandimento dei retini. Ai quattro angoli si possono vedere le "L" che servono per il corretto posizionamento dello strumento. A destra i due componenti affiancati.....	pag. 94
106 – I due retini di un fessurimetro moiré messi a confronto.....	pag. 95
107 – I due retini di cerchi concentrici. A sinistra (in rosso) il retino 1, a destra (in nero) il retino 2.....	pag. 96
108 – I due retini sovrapposti. A sinistra ancora con differenti colori (il retino inferiore in rosso) per sottolineare l'apporto di ognuno dei due al disegno finale delle frange di interferenza. A destra invece si possono vedere i due retini in nero come nello strumento reale.....	pag. 96
109 e 110 – Due stralci del programma disponibile sul web. Nella figura a destra possiamo notare il disegno delle frange per uno spostamento di + 0.3 mm sull'asse x e di + 1.1 mm sull'asse y.....	pag. 97
111 e 112 – Stralci dall'articolo Y. C. Park e S. W. Kim che danno idea delle dimensioni dei loro retini.....	pag. 98
113 – Rappresentazione delle lunghezze r e R.....	pag. 99
114 – Rappresentazione del punto O, intermedio tra i centri dei due retini.....	pag. 100
115 – Rappresentazione del punto O, intermedio tra i centri dei due retini, e delle distanze adimensionali ρ , ρ_1 e ρ_2	pag. 100
116 – Grafico della variazione della distribuzione di intensità dei due retini al crescere di ρ (θ costante).....	pag. 103
117 e 118 – Grafici della variazione di fase ψ al crescere dell'angolo azimutale θ in casi di spostamento grandi. A sinistra si vede un grafico che presenta dei salti di 2π a causa dei limiti della funzione arcotangente. A destra si vede invece la sinusoidale continua con la corretta ampiezza di oscillazione.....	pag. 104
119 – Grafico della variazione dell'errore percentuale commesso utilizzando due intervalli diversi di integrazione.....	pag. 106
120 – Il punto O' e le sue relazioni con il punto O.....	pag. 107
121 – Grafico delle fasi ottenute senza errore di centraggio (in blu); con un errore pari a 0.2 R nella direzione dello spostamento (in verde) e con un errore pari a 0.2 in direzione ortogonale a quella dello spostamento (in rosso).....	pag. 107
122 – Individuazione del baricentro dei retini. Le linee in azzurro segnalano i raggi per i quali non viene mai trovata una zona di nero pieno; in arancio si vede un raggio che trova questo nero ed in rosso si vede il raggio che individua il nero ad una distanza maggiore: quello sarà l'angolo che si stava cercando.....	pag. 108
123 – La finestra del programma informatico che esprime il grado di similitudine tra un'alternanza di chiari e scuri imposta come obiettivo della ricerca e l'alternanza reale che si trova nell'immagine che si sta elaborando. In questo modo si riescono ad identificare i marker del fessurimetro (picchi).....	pag. 109
124 – Il baricentro dei retini come punto medio della congiungente dei punti medi delle due diagonali individuate dai marker.....	pag. 109
125 – Una schermata tipo del programma informatico che elabora i retini dei fessurimetri moiré.....	pag. 110
126 – Una griglia di riferimento per l'analisi delle immagini.....	pag. 112

127 e 128 – A sinistra la griglia di riferimento direttamente incollata sulla superficie; a destra invece preventivamente incollata su di un supporto metallico a sua volta fissato sulla muratura.....	pag. 112
129 – Quattro coppie di mire incollate.....	pag. 113
130 – Schematizzazione del procedimento logico del metodo dell'analisi delle immagini.....	pag. 114
131 e 132 – Confronto tra due fotografie scattate in maniera analoga: da posizione molto simile, dallo stesso operatore, con le stesse condizioni di illuminazione. A destra si può notare come una leggera indecisione abbia compromesso la definizione del fotogramma.....	pag. 115
133, 134 e 135 – Una serie di 3 fotografie simili facilmente riconoscibili tra loro grazie ad un piccolo pezzo di carta che inserisce inequivocabilmente un'informazione chiave al loro interno.....	pag. 116
136 – Il riquadro dove inserire le specifiche delle immagini da analizzare e del foglio di lavoro da creare.....	pag. 117
137 e 138 – Il riquadro dove inserire le specifiche delle mire da ricercare e quello dove disegnare le zone da analizzare dell'immagine.....	pag. 117
139 – La schermata completa del programma che analizza le immagini.....	pag. 139

4_ VERIFICHE IN LABORATORIO SULL'ACCURATEZZA DEI METODI DI MISURAZIONE

140 – Pressa elettromeccanica Instron 8562.....	pag. 122
141 e 142 – Particolari della pressa elettromeccanica servocontrollata Instron 8562.....	pag. 123
143 e 144 – Particolari della pressa elettromeccanica servocontrollata Instron 8562.....	pag. 123
145 – Interfaccia digitale della pressa Instron 8562.....	pag. 124
146 – Il piatto in acciaio avvitato sopra il piatto fisso della pressa Instron 8562.....	pag. 124
147 e 148 – Punte estendibili utilizzate per verificare la centralità del blocco di calcestruzzo.....	pag. 125
149 e 150 – Incollaggio del primo blocco di calcestruzzo sul piatto inferiore della Instron 8562.....	pag. 125
151 e 152 – Fissaggio dei due blocchi di calcestruzzo con dei morsetti per stabilizzare la fase di incollaggio.....	pag. 126
153 – Fissaggio di incollaggio dei blocchi di calcestruzzo sui piatti in acciaio della Instron 8562.....	pag. 126
154 e 155 – Movimento della Instron 8562 per indurre uno sforzo di compressione che agevoli l'incollaggio.....	pag. 127
156 – La superficie di contatto dei due blocchi di calcestruzzo.....	pag. 127
157 – Un trasduttore induttivo di spostamento.....	pag. 129
158 – L'interfaccia digitale sulla quale avvengono le letture dei segnali elettrici.....	pag. 130
159 – Fase di incollaggio dei supporti metallici.....	pag. 130
160 – I trasduttori induttivi fissati sui blocchi di calcestruzzo.....	pag. 131
161 – Il deformometro meccanico Huggenberger EDU II e gli strumenti in dotazione nella valigetta.....	pag. 136
162 e 163 – Le due dime (di posizionamento e di azzeramento) a sinistra. A destra la scatola che contiene tutte le differenti basette a disposizione.....	pag. 137
164 e 165 – Individuazione dei punti di incollaggio delle biffe metalliche attraverso un righello da legno ed una matita.....	pag. 137
166 e 167 – Incollaggio delle biffe metalliche con una colla cianoacrilica.....	pag. 138
168 – Posizionamento delle seconde biffe della coppia mediante la dima di riferimento in invar (base 250 mm).....	pag. 138
169 – Le quattro biffe incollate sui due blocchi di calcestruzzo.....	pag. 139
170 – L'interfaccia digitale della pressa elettromeccanica servocontrollata Instron 8562.....	pag. 140
171 e 172 – Esecuzione delle letture dritta e inversa con il deformometro meccanico digitale (letture B).....	pag. 142

173 – Il deformometro Huggenberger EDU II a base 250 mm e gli strumenti in dotazione nella sua valigetta.....	pag. 144
174 – Il banco di taratura (in basso a destra) e la sua interfaccia dove leggere gli spostamenti.....	pag. 145
175 – Posizionamento delle due basette su piano verticale attraverso una dima in acciaio invar (base 250 mm).....	pag. 145
176 – Prime letture sul deformometro Huggenberger EDU II.....	pag. 146
177 e 178 – A sinistra l'operatore A mentre esegue una lettura sul deformometro Huggenberger EDU.	
A destra l'operatore B mentre esegue una lettura sul deformometro Huggenberger EDU II.....	pag. 147
179 – L'operatore C mentre esegue una lettura sul deformometro Huggenberger EDU II.....	pag. 147
180 – Grafico dei valori letti con i due deformometri meccanici messi a confronto.....	pag. 149
181 – Un fessurimetro piano posizionato sullo zero.....	pag. 151
182 e 183 – Applicazione della colla a presa rapida e del mastice solido sul fessurimetro piano.....	pag. 152
184 e 185 – Il fissaggio del fessurimetro sui blocchi di calcestruzzo.....	pag. 152
186 e 187 – Un fessurimetro moiré durante l'incollaggio delle due diverse componenti.....	pag. 159
188 – Un fessurimetro moiré.....	pag. 160
189 e 190 – Il fessurimetro moiré applicato sulla faccia "anteriore" (insieme con gli altri strumenti).....	pag. 161
191 e 192 – Il fessurimetro moiré applicato sulla faccia "posteriore" ad un angolo di circa 30°.....	pag. 161
193 e 194 – Applicazione della vaselina tra i due componenti per perfezionare l'aderenza.....	pag. 162
195 – La macchina fotografica, modello Canon EOS 300D DIGITAL, fissata sul cavalletto ed il riflettore ancora spento	pag. 163
196 – La macchina fotografica digitale, modello Kodak V1273, utilizzata per le fotografie da posizione variabile.....	pag. 164
197 – La stampa dalla quale sono state ricavate le mire e la griglia di riferimento.....	pag. 176
198 e 199 – La macchina fotografica, modello Canon EOS 300D DIGITAL, il cavalletto ed il riflettore ancora spento.....	pag. 176
200 – Le mire e la griglia di riferimento per l'analisi delle immagini insieme agli altri strumenti applicati.....	pag. 177
201 – La griglia di riferimento e le mire utilizzate durante la prova in laboratorio.....	pag. 178
202 – La nomenclatura delle mire e delle basi considerate nella tabella precedente.....	pag. 181
203 e 204 – Grafici a barre che mettono a confronto i valori delle misure ricavate con i metodi utilizzati nello svolgimento della prova in laboratorio. In basso si evidenziano i valori numerici.....	pag. 186
205 e 206 – Grafici a barre che mettono a confronto gli errori assoluti delle misure ricavate con i metodi utilizzati nello svolgimento della prova in laboratorio in rapporto ai valori dei trasduttori induttivi.....	pag. 187

5_ CONFRONTO TRA I METODI DI MISURAZIONE TRAMITE VERIFICHE IN SITU AD ARCISATE

207 – Il fronte principale della chiesa di S. Vittore ad Arcisate e la torre campanaria.....	pag. 192
208 - Un trasduttore potenziometrico (modello GEFran PZ67-S) come quelli installati sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate.....	pag. 195
209 – Un trasduttore potenziometrico (modello GEFran PZ67-S) applicato sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate.....	pag. 196
210 – Servoaccelerometri (monitoraggio dinamico) installati sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate.....	pag. 196
211 – I due computer predisposti all'acquisizione dei valori del monitoraggio dinamico (a sinistra) e statico (a destra).....	pag. 197
212 - Gli strumenti di misura applicati su una fessura della torre campanaria di S. Vittore.....	pag. 198
213 – Le difficoltà di accessibilità del punto in cui si trova una fessura sulla torre campanaria di S. Vittore.....	pag. 199

214 – La torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate. Si noti la disomogeneità del suo tessuto murario.....	pag. 199
215 – La torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate (fronti est e nord).....	pag. 203
216 – Una fessura al quarto livello con un trasduttore potenziometrico e le basette per la lettura con il deformometro meccanico digitale già applicati.....	pag. 204
217 – I grafici degli spostamenti registrati su tutte le fessure monitorate.....	pag. 205
218 e 219 – La fessura S2 al quarto livello e la fessura S3 al quinto livello evidenziate da un colore rosso.....	pag. 205
220 – Il trasduttore potenziometrico con aggiunte le rondelle e, appena sopra, le basette per la misurazione con il deformometro meccanico a base 250 mm sulla fessura S3.....	pag. 206
221 – Prove di posizionamento del fessurimetro moiré sulla fessura S3.....	pag. 207
222 – Fase di adesione dei due componenti del fessurimetro moiré tramite vaselina.....	pag. 207
223 e 224 – Fase di incollaggio del fessurimetro moiré sulla muratura con mastice solido per marmi.....	pag. 208
225 – Ultima fase di assestamento della posizione dei due componenti del fessurimetro moiré sulla fessura S3.....	pag. 208
226 – Il fessurimetro moiré definitivamente incollato sulla fessura S3.....	pag. 209
227 – Vista frontale del fessurimetro moiré poco dopo l’incollaggio.....	pag. 209
228 – Prove di posizionamento della griglia di riferimento.....	pag. 210
229 – Il taglio delle mire ad una ad una.....	pag. 211
230 – La posizione delle 14 mire (in rosso) e delle griglia di riferimento (in giallo) sulla fessura S3.....	pag. 211
231 – La fessura S3 una volta ultimate le operazioni di fissaggio di tutti gli strumenti.....	pag. 212
232 – La fessura S2 prima di iniziare le operazioni di fissaggio degli altri strumenti.....	pag. 213
233 e 234 – Lo scorrimento delle rondelline sulle viti. A destra una prima prova di posizionamento nelle cavità che la fessura S2 presenta poco sotto l’apertura.....	pag. 214
235 – L’applicazione della vaselina sui due componenti del fessurimetro moiré.....	pag. 215
236 – La fase di incollaggio del fessurimetro moiré sulla muratura attraverso mastice solido per marmi.....	pag. 215
237 – Il fessurimetro moiré incollato sulla fessura S2.....	pag. 215
238 – La griglia di riferimento fissata sulle viti incollate nelle cavità della muratura.....	pag. 216
239 – Il fissaggio della prima rondella sull’estremità destra del trasduttore potenziometrico.....	pag. 216
240 – Verifica e correzione della posizione delle rondelle con una dima.....	pag. 217
241 e 242 – Taratura del deformometro meccanico a base 140 mm e prima misurazione di prova.....	pag. 217
243 e 244 – Fase di incollaggio delle mire per il metodo dell’analisi delle immagini.....	pag. 218
245 – Le cinque coppie di mire (in rosso) e la griglia di riferimento (in giallo) per il metodo dell’analisi delle immagini sulla fessura S2.....	pag. 218
246 – Tutti gli strumenti applicati sulla fessura S2 (con l’aggiunta in basso dell’ultima mira).....	pag. 219
247 – Dettaglio del fessurimetro moiré incollato sulla fessura S2.....	pag. 219
248 – Tutti gli strumenti applicati sulla fessura S3.....	pag. 220
249 – Dettaglio del fessurimetro moiré incollato sulla fessura S3.....	pag. 220
250 e 251 – Le due fessure oggetto di monitoraggio e tutti gli strumenti prima di iniziare le misure.....	pag. 222
252 – Particolare dell’incollaggio della nuova basetta in sovrapposizione a quella precedentemente incollata alla muratura.....	pag. 222
253 e 254 – Il quinto livello. Si notino le difficili situazioni di movimento e la posizione degli strumenti accessori come riflettore, cavalletto e macchina fotografica.....	pag. 223
255 – Il deformometro Controls a base 140 mm sulla fessura S3. La lettura viene eseguita sulle bollinature fatte sulle rondelle fissate agli estremi del trasduttore potenziometrico.....	pag. 224

<i>256 e 257 – I due deformometri a base 250 mm. A sinistra il modello Huggenberger EDU; a destra il modello Huggenberger EDU II.....</i>	<i>pag. 224</i>
<i>258 – Il trasduttore potenziometrico Gefran PZ67-S fissato sulla fessura S3 ad Arcisate.....</i>	<i>pag. 225</i>
<i>259 – Individuazione delle tre coppie di mire che sono state utilizzate come basi nell’analisi delle immagini.....</i>	<i>pag. 230</i>
<i>260 – I valori degli spostamenti relativi ottenuti attraverso tutti i diversi metodi sulla fessura S3 della torre campanaria. Si noti come sembra esserci una relazione tra ampiezza della base di misura e valori misurati.....</i>	<i>pag. 233</i>
<i>261 – Le basi di misura di ogni strumento sulla fessura S3 della torre campanaria.....</i>	<i>pag. 233</i>

Indice delle tabelle

1 e 2 – Numero e denominazione degli strumenti applicati sul Torrazzo per il monitoraggio statico e dinamico.....	pag. 74
3 – Localizzazione di tutti i trasduttori LVDT installati.....	pag. 77
4 – Localizzazione di tutte le termoresistenze RTD installate.....	pag. 79
5 – Localizzazione di tutti gli anemometri installati	pag. 81
6 – Localizzazione dei servoaccelerometri installati	pag. 83
7 – Esempio del foglio di lavoro che rappresenta il prodotto finito dell'analisi delle immagini Per ogni fotogramma si riportano i valori delle coordinate delle mire (x, y), la lunghezza calcolata delle basi (LB) ed infine lo spostamento relativo per ogni base (ΔB). I valori riportati sono solamente un esempio.....	pag. 119
8 – Gli spostamenti indotti sui due blocchi di cls attraverso la pressa elettromeccanica Instron 8562.....	pag. 128
9 – I dati delle letture degli impulsi elettrici trasmessi dai due trasduttori induttivi.....	pag. 132
10 – La conversione dei valori letti in spostamenti metrici per la lettura A.....	pag. 133
11 – La conversione dei valori letti in spostamenti metrici per la lettura B.....	pag. 134
12 – Il valore metrico medio degli spostamenti avvenute sui due blocchi di cls messo a confronto con il dato immesso attraverso la pressa Instron 8562.....	pag. 135
13 – I dati delle letture degli spostamenti eseguite con il deformometro meccanico Huggenberger EDU II.....	pag. 141
14 – I dati medi delle letture degli spostamenti eseguite con il comparatore meccanico digitale messi a confronto con i dati ricavati dai trasduttori induttivi e con i valori immessi sulla pressa Instron 8562.....	pag. 143
15 – I valori delle letture effettuate dai tre operatori sui diversi deformometri meccanici con il banco di taratura fermo. In grassetto le letture effettuate con lo strumento dritto; gli altri valori sono di misure eseguite con lo strumento ribaltato.....	pag. 148
16 – Analisi dei valori delle letture effettuate dai tre operatori sui diversi deformometri meccanici con il banco di taratura fermo.....	pag. 149
17 – Confronto tra le letture eseguite da un operatore che non ha partecipato alla prova sul fessurimetro piano, i dati noti degli spostamenti applicati attraverso la pressa elettromeccanica Instron 8562 e la media dei valori ricavati attraverso i trasduttori induttivi.....	pag. 156
18 – Abaco dei fotogrammi presi durante la prova per supportare l'analisi successiva dei retini con griglie di cerchi concentrici dei fessurimetri moiré. Con il segno “–” dopo la misura si evidenzia il fatto che i fotogrammi fanno riferimento agli spostamenti presi una seconda volta “in discesa”.....	pag. 170
19 – I valori degli spostamenti calcolati attraverso l'elaborazione dei retini del fessurimetro moiré per ognuno dei due fotogrammi corrispondenti allo stesso spostamento della pressa Instron; la media dei due valori e quindi gli spostamenti relativi.....	pag. 172
20 – Per ogni fotogramma si riportano i valori degli spostamenti calcolati attraverso l'elaborazione dei retini del fessurimetro moiré, i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi e la differenza tra questi due dati.....	pag. 173
21 – Elaborazione analitica dei valori delle mire e delle basi dall'analisi delle immagini Per ogni fotogramma (due per spostamento della pressa Instron 8562) si riportano i valori delle coordinate delle mire (x, y), la lunghezza calcolata tra le coppie di mire ed infine lo spostamento netto per ogni base. Il termine di paragone è la lettura 0.00 (1°).....	pag. 180

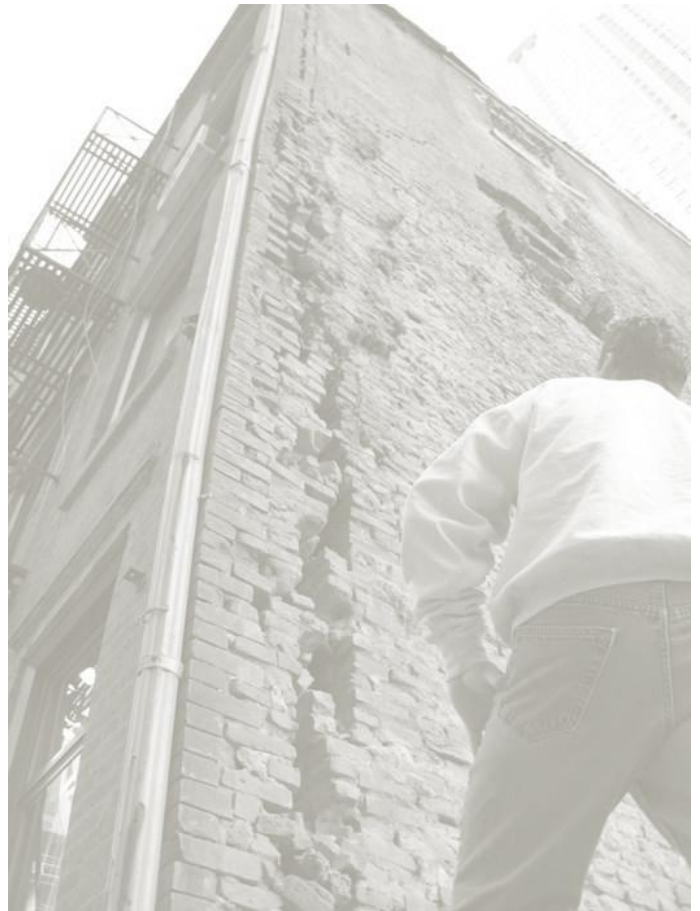
22 – Per ogni fotogramma si riportano i valori degli spostamenti calcolati attraverso l’analisi delle immagini sulle quattro basi (a, b, c e d, la media dei valori e la differenza con i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi. Con il segno “-“ si evidenziano gli spostamenti ripetuti “in discesa”.....	pag. 182
23 – Per ogni fotogramma scattato da posizione variabile si riportano i valori degli spostamenti calcolati attraverso l’analisi delle immagini sulle 4 basi (a, b, c e d), la media dei valori e la differenza con i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi.. Con il segno “-“ si evidenziano gli spostamenti ripetuti “in discesa”.....	pag. 184 pag. 226
24 – I valori ottenuti dai trasduttori potenziometrici Gefran PZ67-S sulle fessure S2 e S3.....	
25 – I valori ottenuti attraverso i tre deformometri a disposizione. Sulla fessura S2 è stata eseguita una sola lettura, mentre sulla fessura S3 i tre strumenti sono anche a confronto tra di loro. Il deformometro Controls ha una base di misura di 140 mm, mentre gli altri due di 250 mm.....	pag. 227
26 – Gli spostamenti relativi ottenuti attraverso i tre deformometri a disposizione. Sulla fessura S2 è stata eseguita una sola lettura, mentre sulla fessura S3 i tre strumenti sono anche a confronto tra di loro. Il deformometro Controls ha una base di misura di 140 mm, mentre gli altri due di 250 mm.....	pag. 228 pag. 229
27 – I valori ottenuti dall’elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré per la fessura S3.....	pag. 231
28 – I valori degli spostamenti relativi ottenuti attraverso l’analisi di tre coppie di mire sulla fessura S3.....	pag. 242
29 – Riassunto delle caratteristiche di tutti gli strumenti utilizzati nella prova in laboratorio.....	

Il lavoro presentato in questa tesi ha come oggetto i fenomeni di fessurazione delle masse murarie ed i metodi di misurazione dei loro spostamenti. Misurare in maniera accurata i movimenti che interessano le fessure di un edificio è un punto di partenza indispensabile per riuscire a comprendere il suo stato di conservazione e per riuscire a prendere corrette decisioni in merito a possibili interventi di consolidamento.

La finalità di questa indagine è di sviluppare e sperimentare due nuovi metodi di misurazione degli spostamenti e verificarne le potenzialità mettendoli a confronti con gli altri metodi consolidati.

Il percorso di questa tesi parte da una classificazione delle fessure, delle leggi di progressione del loro moto e delle principali cause elementari dei dissesti che le provocano. Successivamente si fa un'ampia rassegna dei metodi consolidati del monitoraggio statico delle fessure e degli strumenti che intervengono in questi metodi. La restante parte del lavoro consiste nello sviluppo e nella sperimentazione di un metodo che prevede l'elaborazione delle frange di interferenza formate dai retini dei fessurimetri moiré e nella sola sperimentazione di un metodo che analizza le immagini digitali per individuare la posizione di alcune mire al suo interno.

Per ottenere gli obiettivi che sono stati fissati si sono organizzate due prove sperimentali, delle quali la prima, svolta in laboratorio presso il Politecnico di Milano, ha avuto come scopo principale la definizione del livello di accuratezza dei diversi metodi, nuovi e consolidati, mentre la seconda, svolta sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate, ha fornito interessanti spunti sui vantaggi e sugli svantaggi dell'applicazione di ogni metodo su un vero manufatto architettonico.



Primo Capitolo

I FENOMENI DI FESSURAZIONE

1.1_Classificazione delle fessure, delle loro fasi e delle loro leggi di progressione

1.1.1_Nomenclatura delle diverse parti di una fessura tipo

Per poter affrontare l'argomento oggetto di questa tesi occorre chiarire da subito alcuni aspetti ed alcuni concetti. Bisogna assumere un linguaggio tecnico corretto e condividerlo per poter limitare al massimo le incomprensioni che potrebbero confondere il lettore ed inficiare il lavoro del suo scopo: essere un solido punto di riferimento per lo studio dei fenomeni di fessurazione, dalla loro lettura intuitiva al più raffinato metodo di analisi empirica.

Qualsiasi sia l'origine o l'andamento fisico di una fessura si possono riconoscere alcune sue parti specifiche che si ripetono sempre, anche se con caratteristiche differenti ovviamente, e che sono (Mastrodicasa S., 1993):

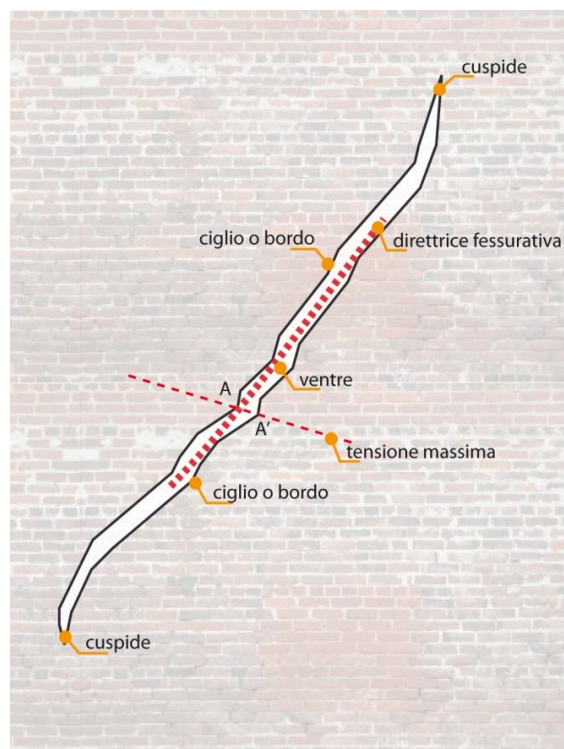


Figura 1 – Individuazione delle parti fondamentali di una fessura tipo

- Linea Di Tensione Massima:

Questa linea ideale rappresenta la tensione principale massima che agiva (ad esempio nei punti A e A') prima della frattura. Geometricamente è la congiungente di questi due punti corrispondenti sui due diversi cigli della fessura. Non sempre è normale alla direttrice fessurativa.

- Direttrice Fessurativa:

E' la linea con la quale si può rappresentare l'andamento delle fessura. Altro non è che il congiungimento dei punti dove si trovano le infinite rotture elementari.

- Ciglio (o bordo):

Sono i due bordi della fessura. Presentano un andamento simile tra loro che permette di riconoscere i punti corrispondenti (A e A') che erano sovrapposti prima della rottura.

- Ventre:

Con il termine ventre si identifica la zona dove la fessura assume la maggiore apertura. Può non rappresentare il punto di originaria rottura e può altresì non presentarsi nella regione mediana tra le due cuspidi. Monitorare il ventre (o i ventri) di una fessura può fornire informazioni sia sul ciclo che sull'entità dell'apertura perpendicolare all'inclinazione di fessura ed anche sui fenomeni di scorrimento parallelo tra i due solidi.

- Cuspide:

Sono gli estremi della fessura. Se la fessura progredisce le cuspidi si spostano e rappresentano i punti dove il materiale si sta rompendo. Monitorare le cuspidi informa il tecnico sul tipo di progressione delle fessura analizzata (nulla, costante, ritardata, accelerata) (Mastrodicasa S., 1993).

1.1.2_Le fasi fessurative

Il rilievo del quadro fessurativo delle strutture edilizie ha lo scopo di comprendere la natura dei dissesti mediante lo studio delle lesioni, delle caratteristiche costruttive e delle condizioni ambientali. Il risultato della diagnosi dei dissesti fornisce le informazioni utili nella ricerca delle cause la cui conoscenza è indispensabile nello studio dei provvedimenti.

Le fessurazioni appaiono nelle seguenti fasi caratteristiche successive:

- Capillare iniziale;
- Capillare progredita;
- Rotatoria;
- Di completo distacco.

Dai particolari caratteri delle fasi appena citate è possibile dedurre gli elementi necessari ad una corretta diagnosi.

- Fase Capillare Iniziale:

In questa fase i rami fessurativi denunciano la loro forma geometrica. Per la diagnosi occorre tener presenti le forme fessurative caratteristiche dei vari dissesti elementari e, almeno, quelle delle loro combinazioni più semplici per poter discernere, fra le tante, quelle che più assomigliano ai tipi in esame. Fatta così l'ipotesi dei corrispondenti cedimenti del terreno, con ragionamenti logici, occorre controllare fino a qual punto essi, applicati che siano al sistema, siano capaci di giustificarne le forme fessurative osservate. Se queste non trovano, in questo modo, la loro giustificazione, è necessario variare opportunamente le ipotesi o integrarle con nuove supposizioni fino a quando, con successivi tentativi, sia possibile pervenire ad una diagnosi soddisfacente.

- Fase Capillare Progredita:

In questa fase, oltre alle forme fessurative, è possibile individuare i punti corrispondenti dei cigli e, con essi, le linee delle tensioni principali massime e minime che operano il distacco. Il procedimento della diagnosi, in tutto identico a quello della fase precedente, per quanto riguarda le forme fessurative, è agevolato dalla conoscenza (anche se sommaria) dello stato interno di tensione precedente alla rottura.

- Fase Rotatoria:

In quest'altra fase i rami fessurativi, oltre a fornire la loro forma geometrica e, nelle vicinanze della cuspide, la corrispondenza dei cigli e quindi le linee delle tensioni principali che operano la rottura, consentono la determinazione delle componenti rotatorie secondo una terna di assi coordinati ortogonali di riferimento.

- Fase di completo distacco:

In quest'ultima fase la diagnosi è più agevole rispetto alle precedenti. Disponendo infatti delle forme fessurative, delle traslazioni elementari, dedotte dalle coppie di punti corrispondenti dei cigli, e degli eventuali residui dei moti rotatori secondari, è possibile risalire alle componenti, secondo gli assi, dei moti traslatori e rotatori principali del solido in sede di cedimento rispetto a un congruo centro di riduzione scelto ad arbitrio.

La risultante delle rotazioni per essere indipendente dal centro di riduzione, resta ben definita nella direzione, nel senso e nella grandezza insieme con le sue componenti secondo gli assi. Non resta invece definita la risultante delle traslazioni perché essa, insieme con le sue componenti

secondo gli assi, dipende dall'ubicazione del centro di riduzione che, per ora, è arbitrario. Ma questa indeterminazione viene via via ridotta con successivi trasporti degli assi delle componenti rotatorie dal centro di riduzione assunto alla sua posizione più probabile o meglio con un adatto impiego di estensimetri. Le componenti della rotazione principale verranno poi distinte da quelle secondarie col procedimento precedentemente indicato (*Mastrodicasa S., 1993*).

Malgrado le difficoltà, non è impossibile per un tecnico che conosce bene i problemi della faticenza muraria andar vicino alla verità nell'apprezzamento dei moti che determinano i dissesti anche nelle fasi iniziali, se è capace di osservare con spirito critico le caratteristiche delle lesioni, delle membrature che ne sono sede e dell'ambiente circostante. Dall'identificazione dei moti rotatori iniziali non gli sarà difficile risalire a quelli traslatori determinanti, separando, in prima approssimazione, quelli intorno ad assi verticali da quelli intorno ad assi orizzontali per considerare i primi come secondari ed i secondi come unione di una parte principale e di una secondaria. In seconda approssimazione, basandosi sulla configurazione geometrica delle linee fessurative e, quando gli sia possibile, sulle traslazioni dei punti corrispondenti dei cigli, oltre che sulla natura dei vincoli, dovrà tentare un'ulteriore distinzione dei moti rotatori intorno ad assi orizzontali per stabilire quali di essi siano principali e quali secondari e da quali componenti di traslazione questi ultimi traggano origine.

Da questa prima intuizione, dedotte che siano le componenti rotatorie e quelle traslatorie principali, il tecnico, per via inversa, dovrà controllare se il sistema dei moti così concepito e delle forze interne così messe in gioco, sia tale da giustificare il quadro di faticenza osservato. Se in questo esame non otterrà un accettabile riscontro con i fatti accertati, modificherà opportunamente le sue intuizioni fino al conseguimento di una soluzione che ne dia una soddisfacente giustificazione, indicandogli la via per le ulteriori indagini al fine di trovare le esatte cause determinanti.

1.1.3_Le varie specie di progressione

E' necessario studiare il progredire delle lesioni nel tempo per conoscere le caratteristiche della loro evoluzione. Se la progressione è nulla il moto è estinto ed il complesso, attraverso il cedimento, ha trovato la sua posizione di quiete. Se la progressione non è nulla, il sistema è indotto in moti ulteriori, con incrementi fessurativi e deformativi, nella ricerca di nuove condizioni di equilibrio.

La progressione del moto può essere ritardata, costante o accelerata (*Mastrodicasa S., 1993*). La progressione ritardata è caratterizzata da manifestazioni sempre più attenuate, nel tempo, che tendono ad estinguersi per lo stabilirsi di una situazione di equilibrio definitivo. La progressione

accelerata è caratterizzata dall'accentuarsi, nel tempo, delle manifestazioni di faticenza che inducono il solido verso stati di equilibrio sempre più precari e, talvolta, irrealizzabili. La progressione costante è caratterizzata dall'uniforme sviluppo, nel tempo, delle manifestazioni di faticenza che si risolvono in moti di progressione ritardata o accelerata.

L'accertamento della progressione delle lesioni vien fatto in maniera diversa a seconda che si tratti di fessurazioni o di deformazioni. L'osservazione va localizzata negli elementi fessurativi e deformativi più caratteristici. Nelle fessurazioni l'indagine va eseguita nel ventre e nelle cuspidi per accertarvi, rispettivamente, gli incrementi dell'ampiezza e della propagazione. Nelle deformazioni si devono prendere in esame gli elementi che hanno subito le traslazioni e le rotazioni più notevoli e quelli disposti lungo le linee che delimitano la deformazione per accertarvi lo sconfinamento eventuale.

E' evidente che, per una corretta valutazione della progressione dei quadri fessurativi attraverso delle osservazioni limitate nel tempo, diventa molto importante conoscere la sensibilità e l'accuratezza dei dispositivi di misurazione adottati.

1.2_Le cause perturbatrici, i dissesti elementari e le fessure attese nei solidi fragili

I fenomeni fessurativi assumono aspetti caratteristici al variare delle cause determinanti (perturbatrici), del tipo di struttura e della natura dell'ambiente. Talvolta le fessure appaiono immediatamente dopo l'inizio del dissesto, come nei casi dei cedimenti fondali, altre volte invece le fessurazioni appaiono negli ultimi stadi, come nei casi di schiacciamento, quando ormai la necessità di un intervento non ammette la minima indecisione.

Ogni manifestazione di faticenza è connessa al dissesto da relazioni di stretta interdipendenza, in modo tale che lo studio delle lesioni possa portare alla determinazione delle cause perturbatrici e, di conseguenza, allo studio ed all'applicazione dei necessari rimedi di primo intervento o di natura definitiva.

Le cause perturbatrici principali si possono suddividere nelle seguenti macrocategorie:

- Cedimenti fondali;
- Cedimenti delle strutture murarie;
- Variazioni termiche e/o igrometriche.

Si tratta per lo più di fenomeni difficili da identificare, che occorre analizzare facendo in primo luogo ricorso ad ipotesi dettate dall'esperienza del tecnico incaricato di risolvere il problema. Queste ipotesi andranno riviste e corrette grazie alle informazioni ed alle deduzioni fatte sulla base della specifica esperienza di quel dissesto e di quel quadro fessurativo che è stata maturata nel tempo trascorso dal primo sopralluogo.

Ovviamente i casi che si presentano hanno un elevato numero di variabili che possono influenzare la reale manifestazione del quadro fessurativo (la tipologia strutturale, la natura dei materiali, la qualità della posa in opera, la qualità del progetto, la natura dell'ambiente, ecc.), e questo potrebbe rendere inopportuno un qualsiasi tentativo di classificazione o catalogazione dei dissesti possibili. Tuttavia viene fatto comunque un tentativo e, riducendo il numero di variabili in gioco, si cerca di elencare alcuni dissesti elementari generati dalle cause perturbatrici più comuni su dei solidi fragili, omogenei ed isotropi.

Per fragilità si intende la tendenza di un materiale a rompersi bruscamente, ovvero senza che avvengano precedentemente deformazioni o snervamenti.

Per solido omogeneo si intende un'unità che non può essere meccanicamente disaggregata in più materiali separati.

Per isotropia si intende la proprietà per la quale le caratteristiche fisiche di un materiale non dipendono dalla direzione in cui si sta analizzando.

Si parte dal presupposto che dalle tensioni è possibile ricavare l'andamento principale delle fessurazioni; con procedimento inverso dunque dovrebbe essere possibile, attraverso l'osservazione e l'interpretazione delle varie direttrici fessurative, risalire intuitivamente alle tensioni che agivano sul solido al momento dell'innescò della fessurazione. Dalle tensioni agenti è possibile successivamente formulare un'ipotesi di dissesto.

Questo studio non ha la finalità di essere esaustivo, né cerca di essere un catalogo definitivo di tutti i possibili fenomeni di fessurazione, piuttosto mira a fornire al lettore una conoscenza di base che lo prepari, in linea teorica, ad affrontare la complessità dei casi reali con un approccio corretto. Come è già stato affermato saranno l'esperienza, l'intelligenza ed il buon senso del tecnico che dovranno supplire all'inevitabile incompletezza teorica. Questi argomenti sono tutt'altro che semplici, e lo ha affermato anche Sisto Mastrodicasa, ingegnere e pioniere del consolidamento: "Mi ero accorto fin dai primi tempi dell'esercizio professionale che consolidare ciò che andava in malora era molto più difficile che edificare a nuovo" (F. Calzuola, 1984).

L'indagine completa dell'argomento è dunque impossibile. Ci si limiterà perciò ai casi più semplici e caratteristici per dedurre da quelli i casi più complessi con ragionamenti appropriati.

1.2.1_Cedimenti fondali

I cedimenti fondali comprendono tutti quei movimenti del terreno su cui poggiano le fondazioni di un edificio, che siano verticali o orizzontali, assoluti o relativi, terminali o intermedi. Con tutta evidenza quelli relativi sono maggiormente interessanti, dal momento che creano degli stati di disequilibrio tra parti connesse di muratura e si vengono così a formare deformazioni e conseguenti fessurazioni sulle stesse. I movimenti assoluti, almeno in linea teorica, interessano tutte le parti di un edificio in maniera identica e per questo non dovrebbero generare dissesti di alcun tipo.

Occorre in questa fase fare delle ulteriori precisazioni sempre nell'ambito del lavoro che segue. Si classificano i cedimenti fondali in intermedi e terminali, in relazione alla loro localizzazione, ed in lunghi, molto lunghi, medi e corti in relazione alla lunghezza del tronco ceduto (L) in rapporto all'altezza (h):

- Cedimenti molto lunghi ($L > 3h$);

- Cedimenti lunghi ($3h > L > 3/2h$);
- Cedimenti medi ($L = 3/2h$);
- Cedimenti corti ($L < 3/2h$)

La classificazione (*Mastrodicasa S.*, 1993) è del tutto convenzionale.

1.2.1.1_Traslazione orizzontale longitudinale relativa

Questo dissesto viene causato dalla traslazione orizzontale del terreno basale che interessa solamente una parte della fondazione di un solido murario. La traslazione avviene in senso longitudinale, ovvero parallelamente al lato maggiore del solido in questione. Questo cedimento è frequente negli edifici con la base fondale posta a poca profondità su terreni argillo-sabbiosi o sabbio-argillosi.

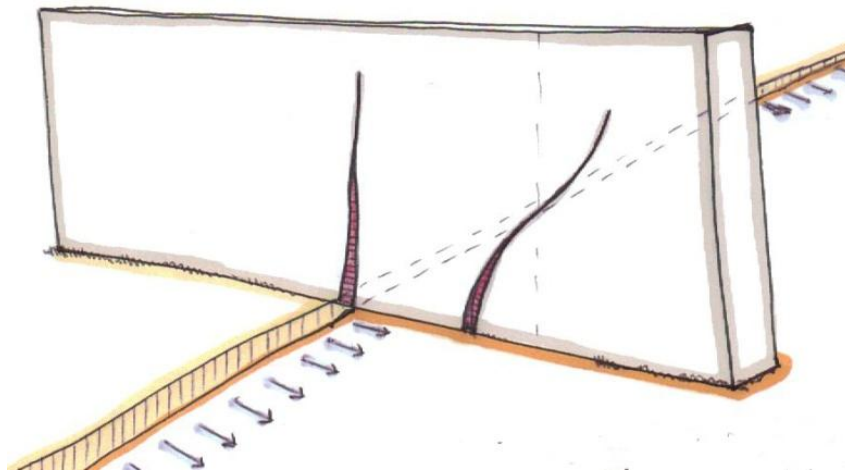


Figura 2 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione orizzontale longitudinale relativa

Su tutta la porzione di solido dalla parte del cedimento si creano delle differenti tensioni tangenziali nei successivi strati orizzontali, che sono massime alla base per annullarsi in sommità. Proprio per questo tipo di tensioni si stabiliscono la frattura verticale centrale verticale. Nelle regioni a destra della verticale media di frattura le fessurazioni si inclinano dalla parte del cedimento, perché agiscono anche il taglio dovuto al trascinamento della massa sottostante a la compressione dovuta al peso proprio del muro sovrastante.

Le massime ampiezze fessurative le possiamo notare alla base del solido su tutte e due le tipologie di fessurazioni.

1.2.1.2_Traslazione orizzontale trasversale relativa: cedimenti corti

La traslazione orizzontale trasversale, normale al fronte murario, è dovuta a fenomeni alternativi di contrazione e di dilatazione del terreno. Questo movimento del terreno si semplifica come concentrato nel baricentro della base della porzione di solido che sta cedendo e per questo comporta assieme ad una forza di trascinamento anche un momento.

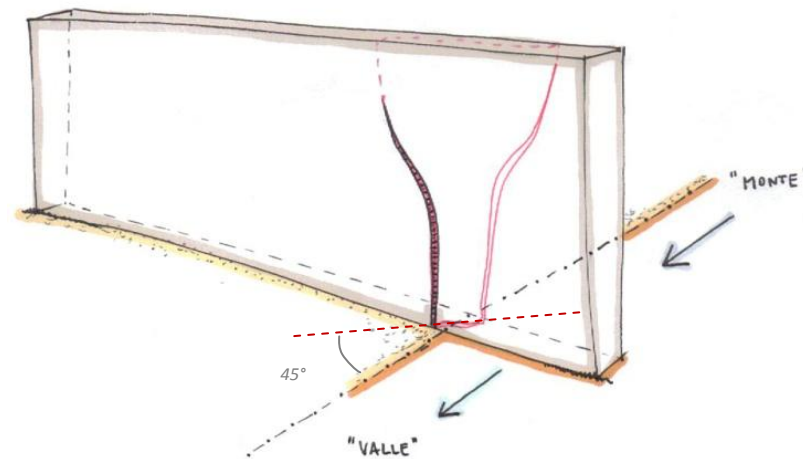


Figura 3 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione trasversale relativa di una porzione corta del solido

La fessurazione originaria si stabilisce alla base nella sezione al limite del cedimento inclinata a 45° sulla direzione del moto con i rami terminali normali ai paramenti. La frattura completa si sviluppa in un'unica falda che investe tutta la regione superiore del muro con le seguenti caratteristiche: fessurazioni paramentali a gola piuttosto raddrizzate sulla verticale nei rami inferiori per l'azione del peso, ed invertite nei due paramenti in modo che l'inclinazione volga dalla parte del cedimento nel paramento "a monte", e dalla parte opposta in quello "a valle". Anche verso l'alto gli apici fessurativi si inflettono normalmente ai paramenti.

Le massime ampiezze fessurative le troviamo nella base fondale. Le stesse si riducono gradualmente procedendo verso l'alto, dove i rami tendono a svanire anche nelle fasi di poco precedenti a quella di completa rottura.

1.2.1.3_Traslazione orizzontale trasversale relativa: cedimenti lunghi

In questa tipologia di dissesto abbiamo due porzioni del solido che non subiscono deformazioni né fessurazioni, l'una perché troppo lontana dal terreno che sta cedendo, l'altra perché, completamente aderente al terreno che si muove, lo segue senza inflettersi. Tra queste però troviamo una regione

dove si concentrano gli sforzi. Questo tronco subisce una deformazione per flessione e taglio che lo porta alla manifestazione delle fessure verticali sui fronti (dovute principalmente alla flessione) ed a quelle a gola in base ed in sommità. Le fessure verticali si vedono per prime ma tendono a stabilizzarsi anche con il fenomeno in progressione. Quelle sulle basi invece si continuano a sviluppare e da queste si propaga poi la definitiva superficie di frattura. Una differenza sostanziale tra la fessura basale che caratterizza questo dissesto e quella del dissesto descritto nel paragrafo precedente sta nel fatto che la fessura dei cedimenti lunghi volge gli apici tangenzialmente ai paramenti, mentre la precedente lo faceva normalmente.

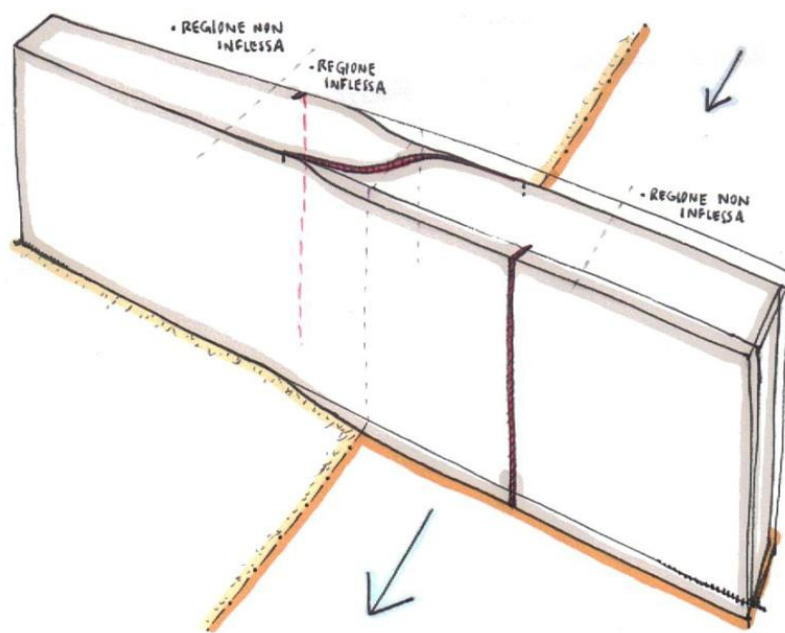


Figura 4 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione trasversale relativa di una porzione lunga del solido

1.2.1.4_ Traslazione verticale assoluta di un solido contiguo ad uno in posto

Questo caso descrive la situazione di un solido (magari di più recente costruzione) che poggia su un terreno che trasla verticalmente verso il basso, mentre un altro solido che è adiacente al primo giace su un terreno che è ormai stabile. La loro zona di contatto è luogo di sforzi e di deformazioni che portano ad un particolare quadro fessurativo: si possono presentare più punti di rottura con inclinazioni differenti, anche se tutte tendono verso il solido che sta scendendo. Le inclinazioni sono massime (senza mai arrivare a 45°) poco sopra la metà dell'altezza, mentre sono vicini alla verticale sui cigli superiore ed inferiore. La velocità di questo raddrizzamento è differente dal momento che si compie in due porzioni di altezza differente (quella superiore è più piccola per cui il raddrizzamento avviene più repentinamente). Questa situazione si può notare nella fase iniziale, mentre nella fase

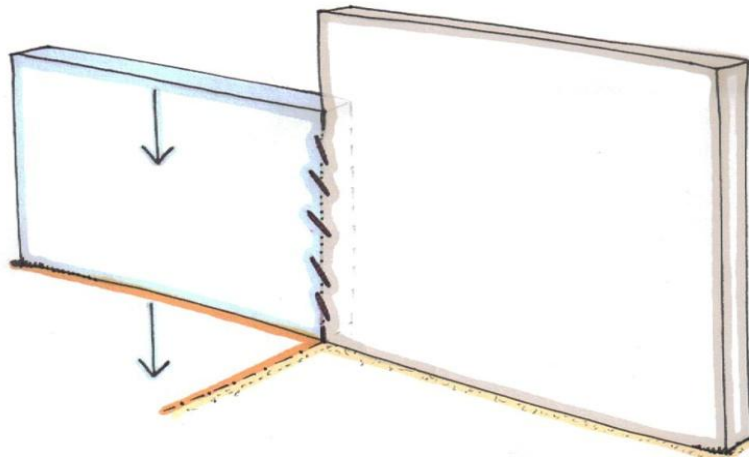


Figura 5 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione verticale assoluta di un solido contiguo ad uno in posto

progredita le fessure tendono ad unirsi tra loro formando una sola fessura con andamento sostanzialmente verticale. Le ampiezze massime sono vicino alla base.

1.2.1.5_ Traslazione verticale relativa terminale: cedimenti corti

Supponiamo ora che un muro subisca un moto traslazionale verticale relativo, dovuto ad un cedimento del terreno su cui poggia la sola parte terminale del solido (una porzione non superiore ad una volta e mezzo l'altezza del muro stesso). Il muro considerato, sotto l'azione del peso del tronco a sbalzo, subisce una deformazione alla flessione ed al taglio. Questa deformazione comporta un aggravio della reazione unitaria nella sezione posta al limite del cedimento; in una certa sezione più lontana dal cedimento della precedente il taglio cambia di segno e passa da zero, mentre il momento è massimo.

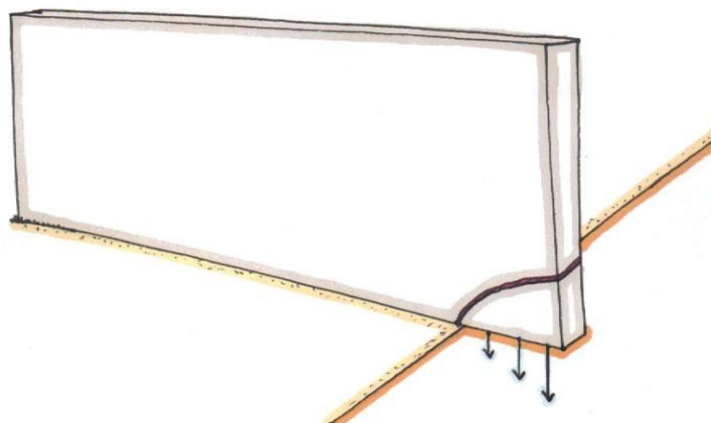


Figura 6 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione verticale terminale relativa di una porzione corta del solido

La fessurazione caratteristica di questo dissesto, che investe solo la parte in sede di cedimento, ha forma semiparabolica e taglia normalmente la testata. Questa fessura può degenerare nel completo distacco di un angolo della parte in sede di cedimento.

1.2.1.6_Traslazione verticale relativa terminale: cedimenti lunghi

Questo cedimento ha la stessa natura del precedente, salvo che in questo caso la porzione del solido in sede di cedimento supera di una volta e mezzo la propria altezza. Anche gli stati tensionali interni sono simili, solamente che in questo specifico dissesto si manifesta un quadro fessurativo differente, in quanto la semiparabola della fessura precedente tende cambiare concavità a circa metà dell'altezza disegnando la forma caratteristica a gola rovescia con inclinazione verso il cedimento (tipo b) a causa del grande peso della porzione di solido che si sta distaccando. In realtà, almeno in linea teorica, dovrebbe essere la tipologia "a" di fessura (ovvero a gola rovescia inclinata verso la sede in posto) quella caratteristica di questo dissesto, ed invece quella del tipo "b" caratterizzare i cedimenti medi. Tuttavia nei casi reali compare molto più spesso il secondo tipo a causa della normale connessione dei muri che impedisce di fatto l'insorgenza di rotazioni secondarie dalle quali deriva principalmente il tipo "a".

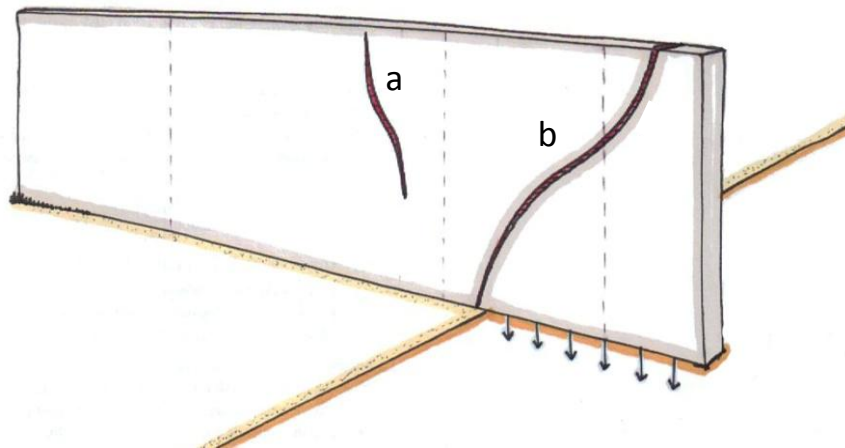


Figura 7 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di traslazione verticale relativa di una porzione lunga del solido

1.2.1.7_Traslazione verticale relativa intermedia: cedimenti lunghi, medi e corti

Con ragionamenti analoghi a quelli fatti per il cedimento terminale è facile ottenere, anche per il cedimento intermedio, il quadro completo delle famiglie fessurative.

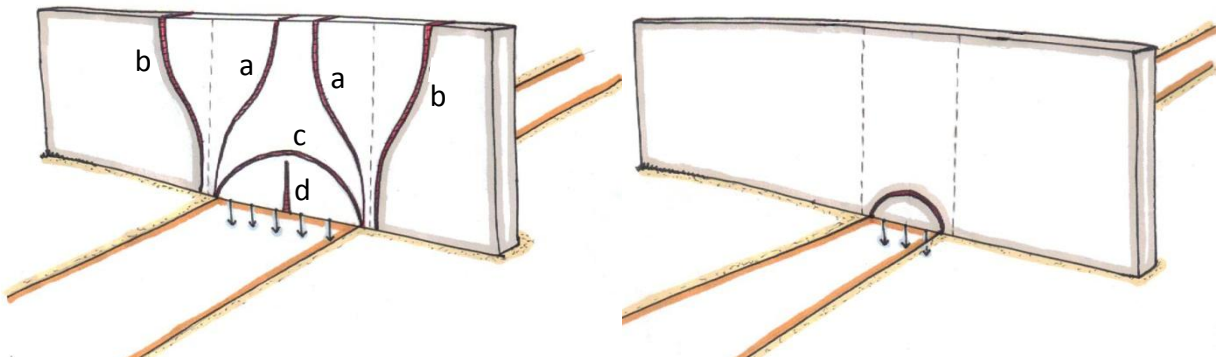


Figure 8 e 9 – Schizzi che schematizzano le fessure attese nel caso di traslazione verticale relativa di una porzione lunga, media (a sinistra) o corta del solido (a destra)

Il tipo “a” è caratteristico dei cedimenti lunghi. In quelli molto lunghi affiora anche la fessurazione “d”. Nei cedimenti medi il tipo di fessurazione caratteristico è quello che nel disegno troviamo denominato con la lettera “b”. Il tipo “c”, che riproduce la classica fessurazione parabolica, è invece caratteristico dei cedimenti corti. Il reciproco impedimento alla rotazione, facendo prevalere gli sforzi di taglio nella costituzione della fessurazione iniziale del materiale, rende frequente il tipo fessurativo “b” anche nei cedimenti lunghi. Nei cedimenti medi e corti l’influenza della rotazione secondaria è irrilevante. Nei cedimenti lunghi dopo l’apparizione del tipo fessurativo “a” possono alternativamente insorgere le due “b” simmetriche oppure la parabolica “c”.

1.2.1.8_Rotazione intorno ad un asse trasversale

Anche in questo dissesto si ripetono gli ormai noti tipi fessurativi “a”, “b” e “c” della traslazione verticale. Diversamente da quanto accade per i cedimenti già descritti nella fase di completo distacco, i quadri sono perturbati da ulteriori manifestazioni fessurative nelle regioni inferiori.

Mentre nella traslazione verticale l’uniforme riduzione della reazione dell’appoggio in sede di cedimento determina nelle vicinanze della sede in posto un forte accumulo della reazione del terreno, viceversa nella rotazione questo accumulo si estende anche nelle regioni in sede di cedimento prossime all’asse di rotazione per il graduale sfuggire del piano fondale all’appoggio del muro. In tal modo il solido, già distaccato dalla frattura nelle regioni medie e superiori, rimane solidale, almeno in un primo momento, con la porzione del muro in posto, nelle regioni inferiori. Ma nel frattempo la maggiore compressione esercitata dal solido contro la base nelle adiacenze della sezione al limite del cedimento, anche dalla parte di questo, fa in modo che l’asse di rotazione originario si trasferisca più verso la parte del cedimento, insieme con la sezione limite del cedimento e la rottura alla flessione, indotta dalla rotazione. Si viene così a formare la caratteristica fessurazione

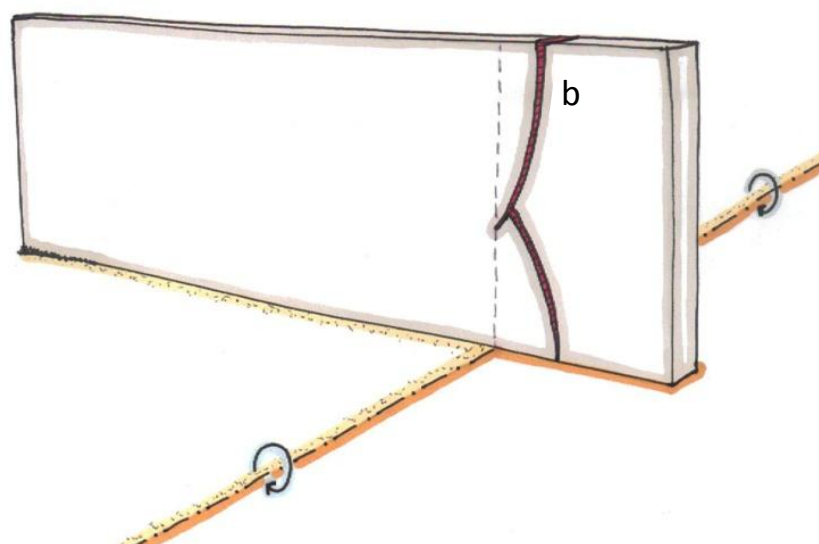


Figura 10 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di rotazione di una porzione intorno ad un asse trasversale

alla base inclinata verso la sede in posto che possiamo vedere evidenziata nel disegno. Si possono trovare contemporaneamente anche delle fessure della tipologia “a”.

1.2.2_Cedimenti delle strutture murarie

I dissesti interni delle masse murarie sono indipendenti dai cedimenti del suolo e derivano, esclusivamente, da deficienze strutturali delle membrature del sistema murario o dall'avvento di altri eventi perturbatori. I dissesti che verranno trattati in questo paragrafo sono:

- Schiacciamento per carichi localizzati;
- Schiacciamento per peso proprio;
- Inflessione per pressoflessione;
- Fenomeni vibratorii;
- Moti ondulatorii longitudinali (per azione sismica).

La classificazione indicata è del tutto formale, anche se necessaria. Ciascun dissesto richiama inevitabilmente qualcuno degli altri come fenomeni riflessi.

In questo paragrafo, a differenza del precedente, saranno maggiori i riferimenti materici legati ai casi reali delle murature sulle quali agiscono questi dissesti. Verrà specificato di volta in volta se il quadro fessurativo fa riferimento a solidi fragili, omogenei ed isotropi come prima, oppure se si fa riferimento a murature reali che non presentano quelle caratteristiche.

1.2.2.1_Schiacciamento per carichi localizzati

Un solido sottoposto alla compressione assiale subisce una contrazione nella direzione del carico ed una dilatazione nelle direzioni normali. Se la dilatazione trasversale supera le capacità coesive del solido, questo si spezza lungo delle superfici di frattura disposte nella direzione della forza perturbatrice.

Lo schiacciamento è il dissesto più pericoloso e quello che ha dato più volte luogo a fenomeni di crollo delle strutture murarie.

Lo schiacciamento presenta tre stadi successivi nelle strutture murarie. Un primo stadio è caratterizzato dal superamento della resistenza alla coesione dei giunti orizzontali di malta, se meno resistente del materiale lapideo o del laterizio. I giunti sottocarico si riducono nello spessore e l'intonaco subisce un accorciamento verticale con conseguenti espulsioni di pellicole di tinteggio, poi di intonaco ed infine di croste murarie superficiali.

Nel secondo stadio subentrano gli effetti delle dilatazioni trasversali del materiale murario che, superati i limiti della tolleranza alla sua distensione, subisce delle fessurazioni a rami corti, alterni, ben distinti, tutti nella direzione della forza perturbatrice che, in genere, è la verticale.

Il terzo stadio è ovviamente il più pericoloso. In questa fase non si può attendere nell'adottare dei provvedimenti. Il quadro fessurativo del secondo stadio si unifica in fratture di notevole estensione che risolvono il solido in più elementi caricati di punta. Più sono le fratture e minore sarà il momento di inerzia con il quale ogni tronco potrà reagire al carico.

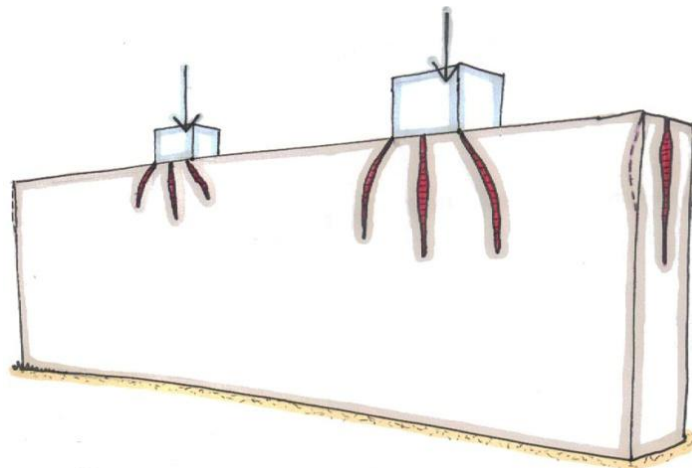


Figura 11 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di schiacciamento del solido a causa di carichi localizzati

Gli sforzi principali sono di taglio e di compressione e sono localizzati in maniera differente, in quanto il taglio prevale nelle regioni immediatamente sotto il ciglio superiore della muratura, dove fa inclinare la linea di ideale fessurazione che invece scendendo lungo la muratura tende a raddrizzarsi

per poi accostarsi definitivamente alla verticale a causa del crescente sforzo di compressione dovuto al peso proprio del solido. Prima ancora che si stabiliscano le fessurazioni paramentali si determina una frattura nel piano medio del muro, localizzata nelle regioni immediatamente sottostanti al carico. Il ventre di inflessione si trova un po' al di sotto del ciglio superiore del muro, per la resistenza alla dilatazione trasversale opposta dall'attrito lungo la superficie di contatto tra l'elemento che scarica il peso (ad esempio una trave) e il muro. I rami di fessurazione sono schematizzati in tre ma possono presentarsi in numero differente.

1.2.2.2_Schiacciamento per peso proprio

Questo dissesto si presenta molto spesso nei maschi murari dei vecchi edifici (e delle vecchie torri) ed è pericoloso tanto quanto il precedente.

Il muro nel disegno, soggetto all'azione del peso proprio, subisce uno stato di tensione interna caratterizzato, in ogni sua parte, dalla compressione verticale. Questa compressione, costante in ogni elemento di ciascuna sezione orizzontale, varia linearmente dal valore zero nel ciglio superiore fino al valore massimo nella base.

Naturalmente la sezione del muro tenderebbe ad espandersi nelle direzioni normali al carico tanto più quanto più procediamo dall'alto verso la base. La reazione d'attrito opposta dal piano alla

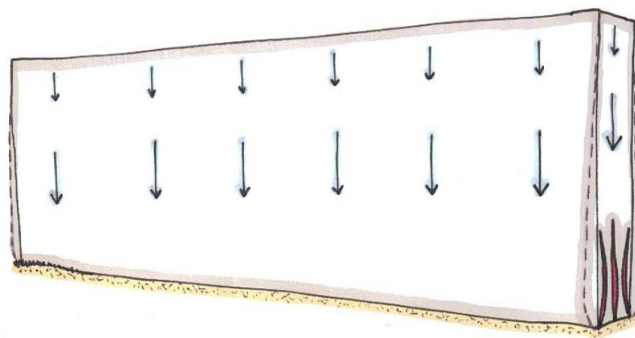


Figura 12 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di schiacciamento del solido a causa del proprio peso

dilatazione del muro fa in modo che la base si allarghi meno di quanto “vorrebbe” e che si determini il caratteristico spanciamento poco sopra il ciglio inferiore. Le linee di rottura hanno una forma iperbolica con tangenti verticali nei ventri delle fessure (sempre poco sopra la base). Nei casi della pratica si manifestano, generalmente, solo i rami inferiori che risalgono non oltre il piano orizzontale che comprende i ventri.

1.2.2.3_Inflessione per pressoflessione

La pressoflessione delle strutture murarie di fabbrica è caratterizzata dallo smembramento della compagine in due o più tronchi verticali separati da superfici di discontinuità irregolari con andamento medio parallelo ai paramenti. Per effetto di questo dissesto i paramenti subiscono un'inflessione concorde o discorde (nella figura 13 è rappresentata l'inflessione discorde), secondo che le frecce d'incurvamento abbiano lo stesso senso o senso contrario. Nelle normali murature di fabbrica si stabilisce, in genere, una sola superficie interna di discontinuità. Solo nei muri di grosso spessore le superfici di discontinuità sono più di una.

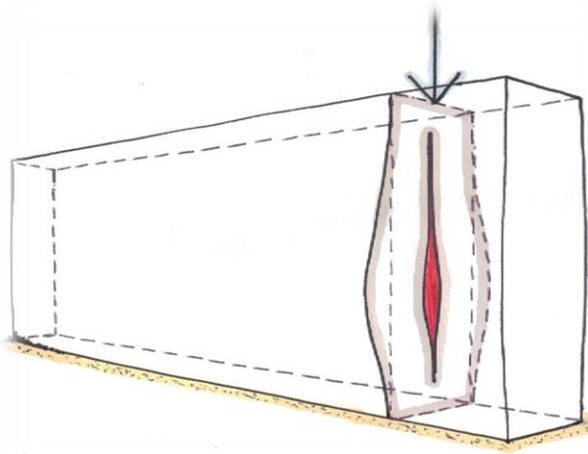


Figura 13 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di inflessione per pressoflessione

I dissesti di pressoflessione si possono riconoscere riguardando i paramenti perché si manifestano con rigonfiamenti. Il punto più prominente si chiama ventre d'inflessione.

1.2.2.4_Fenomeni vibratorii su fessura esistente

Le masse murarie separate dalle fessurazioni entrano in vibrazione simultanea con ampiezza e periodi differenti. I loro moti, velocissimi e discordi, determinano particolari stati di sollecitazione che vanno ad addensarsi agli apici delle fratture facendole progredire.

Nel disegno 14 si possono vedere due tronchi di muro separati da una fessura verticale, ma solidali nella loro parte inferiore. I due tronchi vibrano in maniera differente l'uno dall'altro e le diverse ampiezze delle escursioni, anche se concordi, producono una forte sollecitazione nel punto di cuspide della fessura (in basso). Questo accade perché in quel punto i due tronchi di muro tendono ad assumere due curvature diverse e nella fattispecie il tronco che vibra maggiormente tende a separarsi dall'altro per acquistare una maggiore libertà di moto. La progressione della fessura è più

accelerata nel caso che le due escursioni siano discordi, o più velocemente ancora se sono antagoniste.

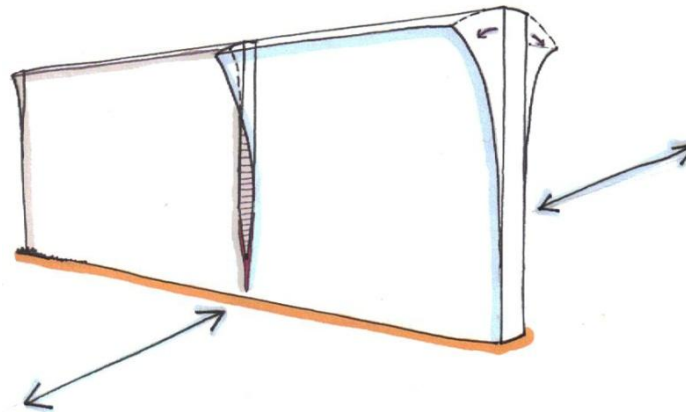


Figura 14 – Schizzo che schematizza l'andamento atteso di una fessura esistente nel caso di fenomeni vibratorii trasversali

1.2.2.5_Moti ondulatori longitudinali

I moti ondulatori e sussultori sono dovuti esclusivamente alle scosse telluriche. A causa di questo fenomeno, oltre alla riapparizione delle vecchie fessure non chiuse a regola d'arte, si manifestano nuove tipologie di fessure. Si prendano in esame i soli moti ondulatori, perché quelli sussultori, aggiungendo l'accelerazione verticale alternativamente positiva o negativa a quella della gravità, provocano un quadro fessurativo in tutto simile a quello proprio dello schiacciamento. I moti ondulatori longitudinali, invece, per l'alternarsi dell'azione tagliante positiva con quella negativa, determinano le caratteristiche fessurazioni "a Croce di S.Andrea", con uno dei rami a 45° sull'orizzonte e l'altro a -45° e con la loro intersezione nella sede dei corrispondenti ventri fessurativi. Queste fessure specifiche sono immediatamente riconoscibili anche se manca qualcuno dei quattro rami emergenti dalla loro intersezione. L'angolo di intersezione dei rami può essere diverso dai 90° a seconda che nell'istante della frattura l'accelerazione sismica sussultoria fosse positiva o negativa, e quindi rispettivamente da sommare o sottrarre all'effetto dell'accelerazione di gravità.

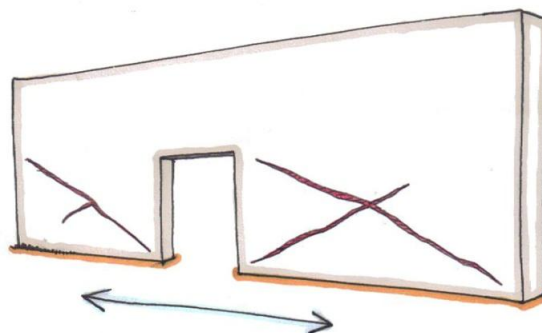


Figura 15 – Schizzo che schematizza le fessure attese nel caso di moti ondulatori longitudinali (terremoto)

1.2.3_Variazioni termiche ed igrometriche

Le variazioni termiche ed igrometriche agiscono su tutti i materiali causando delle dilatazioni o delle contrazioni termiche. Normalmente un aumento della temperatura comporta una generale dilatazione termica dei materiali in qualsiasi stato essi si trovino (liquido, gassoso o solido), che si differenzierà poi per il coefficiente che descrive quanto è grande l'aumento per un incremento unitario di temperatura (a livello atomico si spiega con la variazione dell'oscillazione degli atomi attorno ad un punto di equilibrio, che normalmente viene identificato con la lunghezza di legame).

Il caso di una muratura perimetrale è complesso, perché ci sono molti fattori da tenere in considerazione. Innanzitutto bisogna sottolineare che c'è una differenza sostanziale tra il paramento esterno e quello interno di una muratura, in quanto il primo viene riscaldato superficialmente grazie all'irraggiamento solare e/o raffrescato dall'azione del vento a differenza del secondo per il quale questi fenomeni sono trascurabili.

In secondo luogo occorre, in questa sede, aprire un ventaglio di possibilità che si possono presentare nei casi pratici. Può capitare di analizzare un edificio che è riscaldato in maniera costante nella stagione invernale, ma non è escluso che se ne possa studiare un altro privo di questo diffuso *comfort*. In aggiunta a questo è necessario tenere presente che un edificio, proprio a causa delle condizioni ambientali ed anche del suo utilizzo, ha normalmente comportamenti differenti nelle diverse stagioni dell'anno e questa è una delle ragioni per la quale quando si effettua un monitoraggio di un qualsiasi edificio, è buona norma non far scendere il periodo di osservazione al di sotto dei 18 mesi. In questo modo si hanno almeno sei mesi di dati in condizioni analoghe in due anni consecutivi che saranno correttamente paragonabili tra loro per capire le tendenze in atto. Come è ovvio, se il periodo di tempo fosse più lungo, migliorerebbero senz'altro la precisione e l'attendibilità dello studio.

Si prenda, tra i tanti, l'esempio di un edificio in muratura senza condizionamento dell'aria interna in un giorno d'estate. L'obiettivo è misurare l'apertura di una fessura passante (che consente di essere studiata sia dall'interno che dall'esterno) nel corso di una intera giornata. In questa sede non interessa precisare lo strumento con il quale si effettuerà questa rilevazione.

Con tutta probabilità il paramento esterno durante il dì avrà una temperatura superficiale maggiore rispetto a quella misurata sull'interno. Ne deriva che, per quanto piccola possa essere, ci sarà una dilatazione termica differenziale tra i due fronti, ovviamente a favore di quello esterno. La differente espansione potrebbe creare degli sforzi e dei movimenti interni alla muratura che si rendono più visibili proprio in corrispondenza delle fessure.

I valori di apertura o chiusura di una fessura esistente nell'arco di una giornata possono raggiungere valori superiori ai 150 micron. In caso di mancanza di irraggiamento solare diretto questi fenomeni si riducono in maniera drastica.

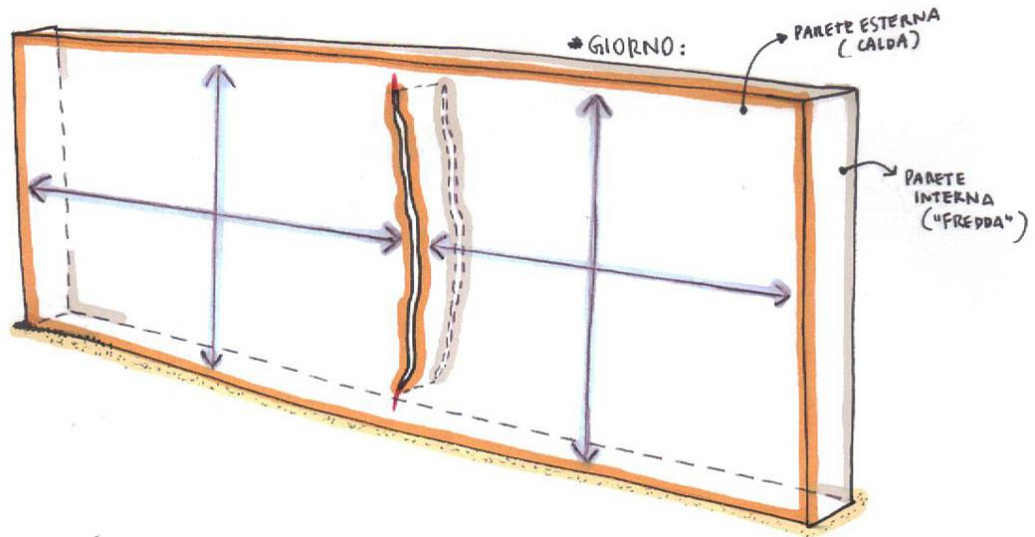


Figura 16 – Schizzo che schematizza il possibile progresso di una fessura esistente su un solido nel caso di variazioni termiche e geometriche

I movimenti di apertura e chiusura ciclici di una fessura sono naturali e non devono preoccupare se si ripetono senza incrementi particolari. E' possibile comunque che questi movimenti agevolino delle ulteriori rotture di materiale ed il progredire del quadro fessurativo nel tempo.

1.3_Le caratteristiche specifiche delle fessure sulle diverse tipologie strutturali

Dopo aver discusso di numerosi casi ideali di fessurazione, ognuno collegato direttamente ad un'unica causa perturbatrice, occorre almeno citare tutti i complessi aspetti che intervengono nei casi reali, in cui diverse sollecitazioni e diversi problemi si manifestano contemporaneamente e con gerarchie sempre diverse. In questo modo si può fornire un'idea più corretta della grande complessità dell'argomento che si sta trattando. Aver affrontato il problema cercando di enucleare per ogni effetto una sola causa può giustamente sembrare un approccio semplicistico, ma comunque esso ha consentito di disporre di un bagaglio di conoscenze indispensabile per poter definire un metodo di lavoro corretto. Col tempo si potrà poi acquisire gradualmente quell'esperienza necessaria per ottenere risultati affidabili.

Indagare le cause di una fessurazione è un'operazione che coinvolge inevitabilmente tutto il suo contesto e non può prescindere da informazioni chiave quali sono i materiali dove si è manifestata, le tipologie strutturali, la qualità dell'esecuzione, le condizioni ambientali, il tipo di utilizzo del manufatto, ecc.

L'obiettivo di questo paragrafo è quello di cercare di sottoporre all'attenzione del lettore alcuni casi reali di fessure, supportati da immagini significative. Ovviamente neanche in questo caso (come nel paragrafo precedente) si cerca di racchiudere tutte le possibili manifestazioni fessurative, anche perché sarebbe davvero un compito impossibile. E' possibile invece far cogliere alcuni aspetti generali che possono differenziare i fenomeni di fessurazione a seconda della tipologia e della qualità delle strutture sulle quali si generano.

Precedentemente si è fatto riferimento a dei solidi composti da un materiale ideale: perfettamente fragile, omogeneo ed isotropo. Nessun materiale da costruzione conserva queste caratteristiche. I materiali che hanno proprietà più simili a quelle sono le ceramiche, ed il vetro in particolare, ma (anche per queste ragioni) non hanno degli utilizzi pratici nelle strutture. I metalli sono omogenei ed isotropi, invece, ma sono sempre duttili e non fragili, ovvero subiscono non poche deformazioni prima di giungere a rottura. Senza cercare di andare più a fondo su questi argomenti, vengono ora proposti dei casi reali brevemente commentati. Gli spunti più interessanti sono rappresentati dalle manifestazioni fessurative sulle masse murarie, che sono i solidi non omogenei per eccellenza, in quanto sono formati da elementi resistenti come pietre o mattoni e da un legante, come calce o cemento, che ha la funzione di rendere collaboranti le diverse parti per formare un solido murario. Anche il calcestruzzo armato è un materiale non omogeneo, né tantomeno isotropo, e si vedranno anche gli effetti di queste sue caratteristiche in altri casi reali.



Figura 17 – Soluzioni di continuità e distacchi dello strato di finitura di un paramento esterno

Si comincia questo percorso a partire dai quadri fessurativi meno preoccupanti, ovvero quelli dove le fessure non rappresentano altro che una soluzione di continuità del solo strato di finitura. Si sta ovviamente facendo riferimento in questo momento a solidi murari che non sono affatto omogenei, anzi sono dei veri e propri pacchetti, in quanto vedono la successione di diversi strati di materiale diverso che adempiono ognuno a degli specifici compiti. L'ultimo strato di un paramento esterno senza funzione strutturale è, nella maggior parte dei casi, un intonaco, di cemento o calce ad esempio, che svolge la funzione estetica di omogeneizzazione del tessuto murario insieme con la funzione di protezione dello stesso. A sua volta l'intonaco non è uno strato omogeneo. Esso viene composto (in maniera diversa a seconda dei casi) da più strati (che si chiamano rinzaffo, arriccio ed intonachino) e quasi sempre ultimato da uno strato di pittura. La prima figura che viene proposta (17) in questo paragrafo mostra numerose soluzioni di continuità proprio nella pellicola pittorica.

Quando una fessura interessa solamente l'intonaco non può in nessun caso rappresentare un sintomo di un dissesto preoccupante. Si tratterà più probabilmente di un errore nella sua stesura che ha determinato un ritiro in fase di asciugatura o di altri fenomeni legati all'evaporazione dell'acqua assorbita dalla muratura ed alla cristallizzazione dei sali in essa contenuti. Altre fessure relative al solo strato di finitura possono capitare in prossimità di soluzioni di continuità negli elementi che funzionano per esso da supporto, come ad esempio nelle figure 18 e 19, dove si può notare una fessura in corrispondenza della zona di contatto tra un pilastro ed il paramento esterno non portante.

La situazione muta sostanzialmente quando una fessura sull'intonaco rappresenta il fenomeno visibile di un dissesto più profondo della muratura interna, il che succede molto spesso. In questi casi il quadro fessurativo che si può vedere è solamente il frutto di un fenomeno ben più avanzato (e probabilmente più preoccupante) sul paramento.

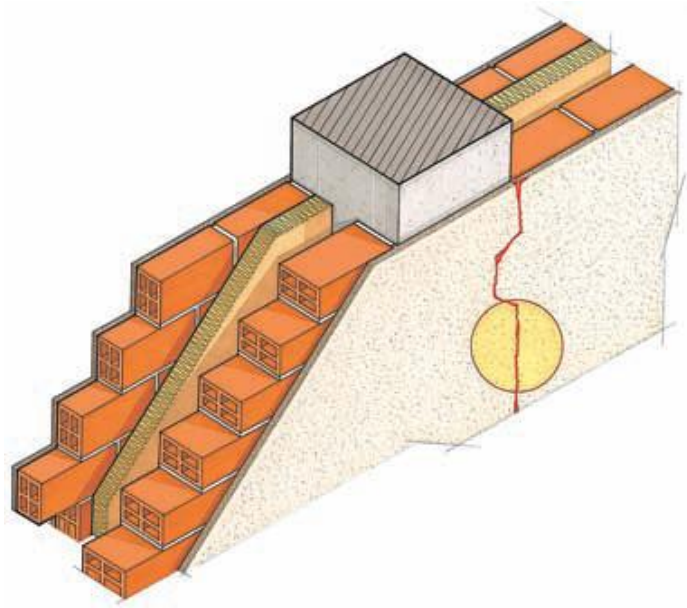


Figure 18 e 19 – Fenomeni di fessurazione verticale del solo strato di intonaco in corrispondenza di un pilastro

Il tecnico esperto dovrà perciò rompere in alcuni punti fondamentali l’intonaco per verificare se la fessura è passante o se invece è limitata all’intonaco. Ovviamente la differenza tra l’avanzamento del dissesto esterno e della muratura sarà ancora maggiore nel caso in cui sarà stato sovrapposto un nuovo strato di intonaco sulla muratura nel corso della vita dell’edificio.

I paramenti esterni negli edifici a telaio non hanno una funzione strutturale specifica e per questo la loro fessurazione non può significare direttamente un rischio di crollo per l’edificio.



Figure 20 e 21 – Una grande fessura nella zona di contatto tra il corpo in posto ed il corpo che sta cedendo

Non di meno i fenomeni di fessurazione su questi elementi possono essere la risposta dell'edificio ad una situazione di dissesto generale che compromette il corretto funzionamento statico dell'edificio, anche se magari le manifestazioni sugli elementi strutturali non sono ancora visibili.

Le figure nella pagina precedente (20 e 21) mostrano un edificio con una grossa fessura (ampiezza di circa un centimetro), che è il risultato di un cedimento fondale relativo del terreno. A causa dell'innalzamento di due piani dell'edificio contiguo si è verificato un abbassamento del terreno su cui poggiano le fondazioni solamente di una parte della struttura. Questo abbassamento porta con sé una porzione di edificio e sollecita fino alla rottura la zona in cui i due blocchi dello stesso edificio sono a contatto. In questo caso la fessura è molto evidente e rappresenterebbe un problema anche solamente dal punto di vista estetico per gli abitanti dell'edificio. Da sola però non può rappresentare un rischio di collasso: occorrerà dapprima monitorare la fessura per risalire al suo stato di progressione, trarre delle conclusioni generiche ed al tempo stesso fare delle verifiche sugli elementi del telaio in calcestruzzo che risulteranno maggiormente sollecitati dopo il cedimento fondale (pilastri e travi dalla parte del cedimento).

In questi casi l'andamento della fessura è solo leggermente influenzato dalla geometria fisica dei laterizi che formano il paramento esterno. Questo accade perché i laterizi in questione sono forati e si fratturano abbastanza facilmente senza modificare in sostanza l'andamento naturale della fessurazione. Queste considerazioni perdono valore nel momento in cui si inizia a parlare di quadri fessurativi su murature portanti di laterizi pieni, per i quali questa volta il punto debole è quasi sempre rappresentato dai giunti di malta.



Figure 22 e 23 – Due esempi di fessure su murature portanti. A sinistra tutto il piano della facciata tende a distaccarsi dal resto dell'edificio. A destra una fessura causata dal peso proprio (andamento verticale) e che si sviluppa nelle zone deboli come la malta

L'analisi strutturale per la valutazione della sicurezza delle costruzioni in muratura piena dovrebbe tener conto, anche nelle scelte inerenti la fase di monitoraggio, di alcune sue caratteristiche che spesso non vengono considerate. Fra tali fattori ve ne sono alcuni che richiedono particolare attenzione: il materiale non rispetta solitamente la continuità, l'omogeneità, l'isotropia; la morfologia della sezione trasversale della muratura influenza molto la distribuzione di sforzi e deformazioni.

In molti casi le dimensioni globali della struttura sono considerevoli. Di conseguenza lo sforzo dovuto al peso proprio, che dura spesso da molto tempo, raggiunge livelli elevati, non lontano dal valore di resistenza del materiale. Una combinazione di tali fattori, insieme a effetti di fatica dovuti ad azioni cicliche indotte dalle variazioni di temperatura, dal vento o anche da azioni sismiche, ne influenzano fortemente il comportamento meccanico e possono certamente essere ritenuti responsabili di danneggiamenti strutturali molto seri e, in alcuni casi, anche di crolli.

In molti casi dunque è semplicemente il peso proprio a svolgere un ruolo importante nella formazione e nella propagazione del quadro fessurativo, ma adesso si cerca di dividere due tipologie di fessure che possono apparire sulle murature portanti:

- Fessure presenti principalmente sulla malta o all'interfaccia fra malta ed elementi resistenti;
- Fessure ad andamento prevalentemente verticale che passano attraverso gli elementi resistenti.

Il quadro fessurativo, formato da linee verticali o sub-verticali, è influenzato dal livello di sforzo, dal rapporto tra materiale resistente e malta e dalla tessitura muraria. Se i giunti di malta rappresentano una zona di debolezza lo sviluppo del quadro fessurativo interesserà soprattutto quelli, altrimenti può tagliare verticalmente anche i mattoni (o le pietre). In generale, un buon ammorsamento tra i paramenti posticipa i fenomeni di fessurazione.



Figure 24 e 25 – Due esempi di fessure su murature portanti. A sinistra si può notare come la fessura abbia spaccato per primo il mattone. A destra invece un caso in cui il quadro fessurativo interessa quasi esclusivamente i giunti di malta

Proseguendo nella citazione dei quadri fessurativi sugli elementi strutturali, si giunge a parlare delle fessure sugli elementi puntuali delle strutture, come pilastri o travi. Questi casi sono i più gravi e preoccupanti, perché la fessura di un elemento massivo, come una muratura portante, genera uno stato parziale di disequilibrio che il più delle volte viene riassetato grazie alla collaborazione delle porzioni immediatamente adiacenti della medesima muratura. Va da sé che un pilastro non può demandare ad altri i suoi compiti strutturali. Generalmente, quando si riscontrano fessure su questi elementi, è consigliabile intervenire repentinamente con un primo intervento di consolidamento, ad esempio una cerchiatura nel caso di un pilastro vicino al collasso.

Di seguito vengono riportate tre immagini (26, 27 e 28) di elementi strutturali fessurati. Negli elementi di calcestruzzo dopo la fessurazione c'è la tendenza all'espulsione del copriferro, ovvero la porzione più esterna dell'elemento, che spesso mette in luce proprio l'armatura (e ne agevola la corrosione).



Figure 26 e 27 – Due esempi di fessure su elementi strutturali in calcestruzzo armato. A sinistra un pilastro di una grande struttura fessurato e vicino al collasso. A destra una trave (armatura in cannuce di legno) inflessa a causa dell'eccessivo sforzo a flessione si è fessurata ed espelle la sua porzione più esterna



Figura 28 – Una trave in legno inflessa e fessurata. E' stata posta una stampella di appoggio poco prima del suo molto probabile collasso

1.4_Formulazione di una prima diagnosi

1.4.1_Primi accertamenti

Prima che vengano previsti eventuali interventi di consolidamento, monitoraggi o indagini specifiche, è sempre opportuno programmare dei sopralluoghi e delle ispezioni visive colte a dare una prima valutazione del loro stato di conservazione.

Il primo approccio consiste quindi nell'osservazione diretta della struttura. Un tecnico, che si appresta all'osservazione di un edificio (antico o recente che sia) nell'ottica di comprenderne il comportamento statico ed i suoi eventuali malfunzionamenti, deve eseguire alcune operazioni preliminari che gli consentano di indirizzare correttamente il suo lavoro e di adottare i provvedimenti più adatti per l'edificio in esame.

In primo luogo occorre fare una ricognizione sommaria di tutti i punti del manufatto per accertare le caratteristiche strutturali del sistema e per distinguere le strutture lesionate da quelle integre. Si potrà in questo modo disporre degli elementi necessari per capire, in termini generali, lo stato di sollecitazione dei vari organismi murari e per delineare il campo delle successive operazioni. Occorre senz'altro già da queste prime fasi iniziare a separare i dissesti che sembrano dovuti ai cedimenti fondali da quelli propri delle strutture murarie. Queste operazioni sono più immediate se i fenomeni di deformazione e fessurazione sono in progressione avanzata e se le cause che li hanno generati non sono complesse. Se il dissesto è nelle sue fasi iniziali (o se deriva da cause complesse) è impossibile formulare una prima diagnosi dalla sola osservazione in sito. Essa dovrà scaturire da indagini più



Figura 29 – Primi accertamenti in sito

approfondite e sarà inevitabilmente frutto di ipotesi che andranno via via perfezionate per riuscire a giustificare in maniera soddisfacente il quadro fessurativo presente.

Nei casi limite l'osservazione può già da subito fornire utili informazioni sulla necessità o meno di impostare tempestivamente un progetto di intervento di consolidamento, qualora la situazione appaia davvero preoccupante. E' naturale che occorra un certo tipo di esperienza e di senso della responsabilità da parte dei tecnici che devono prendere queste importanti decisioni operative.

1.4.2_Dissesti non immediatamente identificabili

Nel caso in cui la situazione non sia pericolosa, bisogna studiare il modo migliore per ottenere un quadro più preciso delle condizioni dell'edificio, ovvero fare un progetto delle indagini da svolgere adeguato al caso in esame. In questo caso gli accertamenti devono seguire una via più lunga e minuziosa.

Viene programmata una campagna di indagini, che può raggiungere diversi livelli di approfondimento, e che in genere si articola nelle seguenti fasi: ricerca storica, rilievo geometrico e materico, rilievo del quadro fessurativo e del degrado, prove in sito e in laboratorio, analisi numeriche.



Figura 30 – Esempio di elaborato di sintesi di un rilievo materico

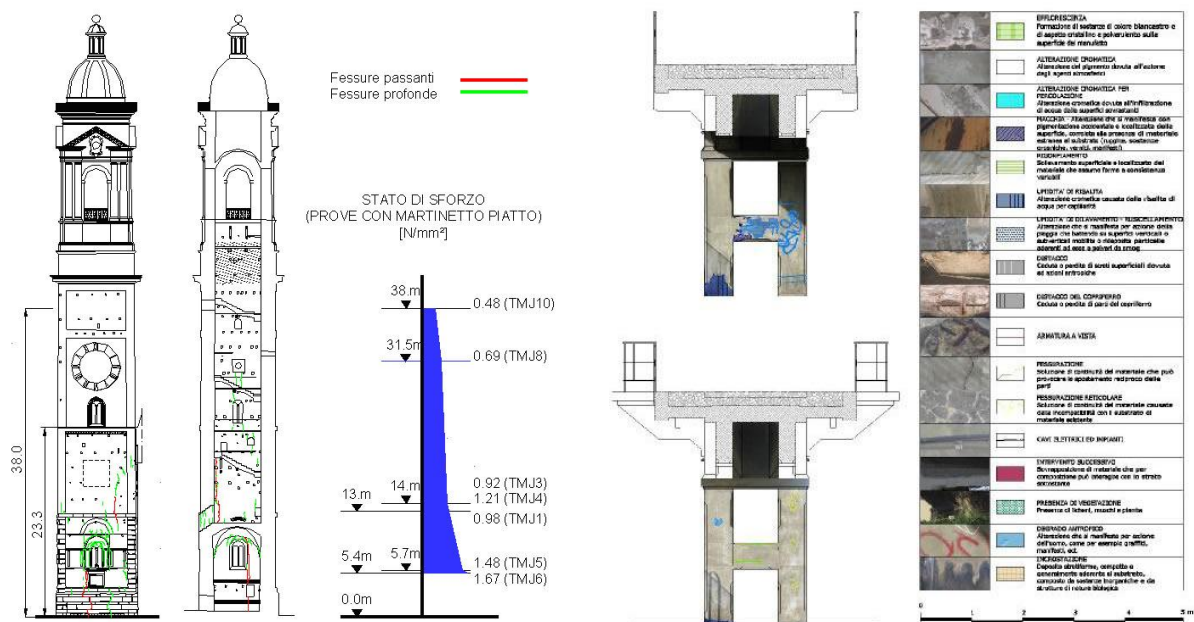


Figure 31 e 32 – Esempi di elaborati di sintesi di un rilievo del quadro fessurativo (a sinistra) e di un rilievo del degrado (a destra)

Il rilievo del quadro fessurativo necessita di un ulteriore approfondimento su come svolgere correttamente le sue singole operazioni. Circoscritte le parti dell'edificio ammalorate, si procede al loro rilevamento planimetrico ed altimetrico per disegnare le varie piante e le sezioni più caratteristiche. Per ogni ambiente verranno descritte le manifestazioni fessurative e deformative riscontrate nel pavimento, nel soffitto e nelle pareti illustrate a parte con dei grafici capaci di rendere immediata la visione delle varie manifestazioni nella loro forma geometrica nelle cuspidi, ventri, ecc.

Le fessurazioni verranno indicate con curve simili alle originali e le deformazioni con opportuni segni convenzionali. Le manifestazioni fessurative più importanti verranno illustrate con opportuni segni grafici. Ciò non è possibile nelle manifestazioni più tenui perché le fotografie, sempre molto piccole rispetto all'originale, non farebbero notare i rami di minore ampiezza insieme con tutti i capillari, sottraendo al tecnico preziosi elementi di giudizio. Nelle fessurazioni è necessario apprezzare in millimetri e nelle frazioni di millimetro l'ampiezza fessurativa per offrire un'idea completa dell'entità del dissesto e così anche l'orientamento delle congiungenti i punti corrispondenti dei cigli. Si annoteranno anche tutte le circostanze che potrebbero aver concorso nel dissesto (come l'acclività e la natura del terreno, la vicinanza di corsi d'acqua, le caratteristiche delle varie membrature di fabbrica, lo stato di conservazione di edifici adiacenti, ecc.).

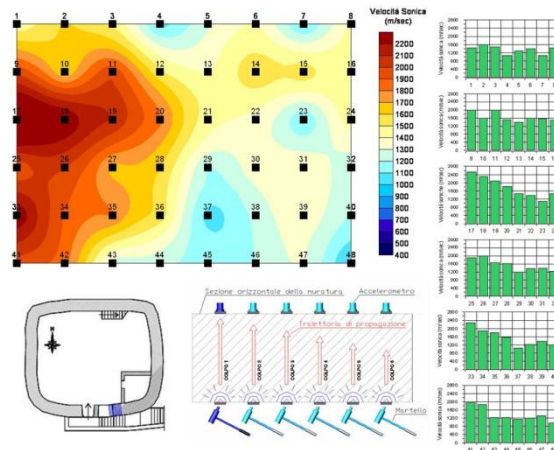


Figura 33 – Esempio di grafici di sintesi di prove soniche effettuate in sito

1.4.3 _Fessurazioni recenti e non recenti

E' facile riconoscere le fessurazioni vecchie da quelle nuove. Le nuove presentano una frattura fresca, chiara, quasi brillante, priva di polvere e ciglia taglienti e ben contornate; le vecchie presentano fratture annerite dal tempo, polverose e ciglia arrotondate e, non di rado, frammenti di ragnatele. Negli accertamenti, quando non è possibile l'ispezione diretta delle superfici di frattura per il carattere capillare delle lesioni, basterà prendere dei frammenti di materiale dalla parte di uno dei cigli e confrontare la superficie di frattura fresca (appena tolta dalla sua sede) con quella da esaminare.

Non è possibile determinare l'epoca in cui è iniziato il processo fessurativo basandosi sul solo stato delle superfici di frattura e dei cigli, perché l'invecchiamento della frattura e dei cigli dipende oltre che dal tempo, dalle condizioni d'ambiente (stato di umidità delle pareti, presenza di esalazioni, materie luride, prodotti della combustione, polvere, qualità dei materiali, ecc.). Se anche il tecnico potrà assumere nella diagnosi con sicurezza che il fenomeno fessurativo è nuovo, o recente, o vecchio, o antico, non potrà mai ricollegare queste locuzioni con le corrispondenti indicazioni del tempo. Questa incertezza influisce sul prolungamento dei dibattiti giudiziari nelle vertenze per danni.

1.4.4 _Discussione

Disponendo di questi dati di fatto, riuscirà agevolato il compito di stabilire le mutue relazioni tra le manifestazioni deformative e fessurative della stessa struttura subite ai vari livelli. Si potrà formulare una nuova ipotesi delle cause del dissesto che giustifichi le manifestazioni accertate.

L'ipotesi formulata verrà poi ricontrollata sulle lesioni rilevate per riscontrare fino a che punto questa le giustifichi. Se la concordanza è perfetta, l'ipotesi è ammissibile.

Se alcune manifestazioni non concordano con l'ipotesi fatta (o vi concordano solo in parte) sarà necessario stabilire la coesistenza del dissesto presunto con un altro che giustifichi quelle discordanze. Anche questa ulteriore ipotesi andrà a sua volta verificata.

1.4.5_Necessità di intervento o progetto di monitoraggio

Nel caso in cui, al termine di queste indagini, si ottenga l'ipotesi che le condizioni dell'edificio sono pericolose, diventa necessario intervenire in modo tempestivo, elaborando un progetto di consolidamento mirato. Se invece la struttura non presenta condizioni di rischio particolari, è utile impostare il progetto di monitoraggio, per il controllo nel tempo del comportamento della struttura. La struttura potrebbe avere trovato, anche grazie alle deformazioni ed alle fessure, un nuovo stato di equilibrio e modificarlo con interventi importanti di consolidamento potrebbe essere inutile, se non dannoso. Viceversa se si attesta che le lesioni sono in atto, o peggio ancora in accelerazione, gli interventi sono indispensabili ed occorre non indugiare in nessun modo.

In questa fase bisogna individuare gli elementi fessurativi e deformativi più caratteristici della struttura per poter ottimizzare la strumentazione che si ha in dotazione per il monitoraggio. Con tutta evidenza non si potranno monitorare tutte le fessure esistenti sull'edificio, ma si dovrà fare un'operazione di cernita, per limitare i costi, i tempi e le energie degli operatori.



Figura 34 – Esempio di intervento repentino di messa in sicurezza

Riuscire a selezionare i punti nevralgici che possono consentire, grazie al monitoraggio dei loro movimenti, di comprendere correttamente lo stato di salute di una struttura è anche questo un compito che richiede una grande esperienza ed una grande dose di buon senso da parte dei tecnici.

1.4.6_Relazione tecnica conclusiva

Nella relazione conclusiva il tecnico dovrà riassumere le risultanze dei suoi studi. Riferirà sulle operazioni e sulle ricerche eseguite per l'accertamento dei dissesti che illustrerà con grafici e fotografie. Farà la discussione dei fenomeni di fessurazione osservati ponendo in rilievo le relazioni tra le manifestazioni accertate per dedurre la diagnosi che formulerà a compendio dei suoi ragionamenti, non senza riportare le risultanze degli accertamenti eseguiti con saggi nelle murature e nel terreno. Proporrà poi anche i lavori di consolidamento più corretti.

In un fascicolo a parte redigerà il preventivo della spesa a corredo del progetto formulando però, nel modo più chiaro possibile, le più ampie riserve sull'attendibilità di questo elaborato, dal momento che il carattere di questi lavori rende quasi sempre necessario un aggiustamento del costo per l'incombenza di modifiche dei lavori durante il cantiere.



Secondo Capitolo

IL MONITORAGGIO STATICO

2.1_Introduzione

Il monitoraggio gioca un ruolo molto importante nel processo di analisi diagnostica di un edificio storico perché contribuisce in maniera significativa ad una miglior comprensione del suo comportamento statico. Queste informazioni sono importantissime ad esempio nei lavori di riqualificazione di un edificio, perché un progetto di questo tipo potrà essere definito in maniera soddisfacente solamente dopo un periodo di osservazione del comportamento delle strutture in funzione dei mutamenti delle condizioni ambientali nel tempo.

Se la valutazione dello stato di conservazione dell'edificio, svolta durante l'osservazione diretta e confermata sia dall'interpretazione delle indagini che dall'analisi numerica, è quella dell'immediata necessità di un intervento di consolidamento, allora non è possibile procedere ad un progetto di monitoraggio, a causa dei lunghi tempi di acquisizione previsti, anche se completerebbe il quadro generale sullo stato dell'edificio preso in esame e porterebbe ad un eventuale progetto di consolidamento più appropriato. In una situazione di questo tipo è necessario intervenire in tempi brevi per ripristinare le condizioni di sicurezza.



Figura 35 – Esempio di intervento preliminare di messa in sicurezza di un edificio pericolante

Dove invece la sicurezza della costruzione non è compromessa, è auspicabile un progetto di monitoraggio, per poter seguire la propagazione nel tempo dei fenomeni in atto. E' opportuno procedere ad una verifica del progressivo aumento delle deformazioni nel tempo, in modo da prevenire situazioni di collasso improvviso della struttura. La diffusione di fenomeni fessurativi evidenziati dal quadro del rilievo, la necessità di conoscere il comportamento statico e dinamico della

costruzione in condizioni normali e in occasione di sollecitazioni esterne indotte e registrarne gli effetti nel tempo, rendono indispensabile la progettazione di un impianto di monitoraggio da installare sull'edificio.



Figure 36 e 37 – A sinistra un esempio di strumenti per il monitoraggio dinamico (accelerometri). A destra un esempio di strumento per il monitoraggio statico (trasduttore potenziometrico)



Figura 38 – Due computer per il sistema di acquisizione dei dati dinamici e statici in sito

Tale sistema consiste nel registrare periodicamente le variazioni di alcuni parametri importanti, come la apertura o la riduzione dell'ampiezza delle lesioni, le inclinazioni, le deformazioni in genere, le variazioni termiche, ecc. Già in passato, in corrispondenza di lesioni estese (di considerevole apertura) si ricorreva a metodi di controllo mediante l'applicazione di spie di vetro, in marmo o in gesso, per monitorare la variazione di apertura delle fessure stesse. Oggi, tuttavia, sono disponibili sistemi di monitoraggio più moderni e precisi, ed altri sono in via di sperimentazione.

Un sistema di monitoraggio installato su un edificio per un giusto lasso di tempo porta principalmente ai seguenti risultati:

- Valutazione del comportamento strutturale mediante una correlazione tra le azioni dell'ambiente (temperatura, irraggiamento solare, ventosità, eventi sismici, cedimenti del terreno...) e le risposte dell'edificio (movimento delle fessure, spostamenti ed inclinazioni degli elementi strutturali, movimenti relativi delle strutture di fondazione, ecc.);
- Studio del comportamento sul lungo periodo per capire la tendenza in atto;
- Definizione di una procedura per controllare puntualmente i comportamenti anomali e le eccedenze del livello di attenzione.

A seconda delle condizioni del sito, ad oggi, il progetto del sistema di monitoraggio statico viene affrontato sostanzialmente in due maniere differenti:

- Utilizzo di trasduttori elettrici e di un sistema di acquisizione continua e di registrazione dei dati;
- Utilizzo di strumenti (installati permanentemente o removibili) su cui fare letture manuali ad intervalli di tempo prestabiliti.



Figura 39 – Esempio di lettura manuale eseguita con uno strumento removibile (deformometro meccanico digitale)

Il primo approccio è sicuramente più interessante ed attrattivo perché permette di monitorare in tempo reale il comportamento delle strutture senza l'ausilio di operatori in sito e permette anche di trasferire i dati a grandi distanze. L'approccio manuale invece richiede la periodica presenza di operatori tecnici sul sito e non è in grado di assicurare un monitoraggio in tempo reale. Tuttavia

l'approccio manuale non deve essere abbandonato perché garantisce informazioni in modo economico in tutti quei casi dove le condizioni ambientali sono talmente avverse da non permettere protezione per i sensori e per il sistema di acquisizione dei dati.

I seguenti aspetti sono da tenere in considerazione nella progettazione di un sistema di monitoraggio:

- Condizioni ambientali:

La scelta di un sistema di misura e del percorso dei cavi devono essere stabiliti dopo un'analisi dettagliata delle condizioni ambientali per riuscire a garantire al sistema una protezione adeguata, una continua e stabile fornitura elettrica, la prevenzione del rumore elettrico e l'ispezionabilità di cavi e assemblaggi.

- Accuratezza:

L'accuratezza di un sistema può essere decisa in base all'analisi di tutti i vari errori (sistematici e casuali) che possono interessare gli strumenti in uso. Per il monitoraggio automatico è importantissimo prestare attenzione non solo all'accuratezza di un componente individuale ma a quella dell'intero sistema nel suo complesso.

- Affidabilità:

Un sistema di monitoraggio è usato in genere per periodi di tempo lunghi, per poter osservare il comportamento di una struttura, perciò deve assicurare una sufficiente affidabilità. Per questo motivo, bisogna prestare particolare attenzione a garantire l'affidabilità in ogni fase: progetto, installazione, lavoro utile. Progettare ed installare un sistema che prenda in considerazione il concetto di ridondanza viene considerato davvero molto efficace nell'assicurare una maggiore affidabilità al sistema stesso. Il sistema deve poter essere periodicamente ispezionato e deve essere in grado di autoanalizzarsi per trovare malfunzionamenti causati da disconnessioni interne, contatti difettosi, ecc. Alcuni difetti dei sistemi automatici di monitoraggio possono essere trovati grazie al raffronto dei valori misurati con quelli previsti.

- Flessibilità:

Una grande flessibilità è auspicabile perché i sistemi di misura devono lavorare in un lungo periodo di tempo e alcuni cambi o sostituzioni di componenti potrebbero essere necessari. Alcuni strumenti possono diventare superflui a causa della decrescente importanza di una misurazione e potrebbe essere importante installare strumenti nuovi. Potrebbe essere necessaria la ricalibrazione di alcuni strumenti in funzione e quelli malfunzionanti dovrebbero essere sostituiti. Tutto questo si

può prevedere già progettando un sistema di analisi e di acquisizione dei dati capace di attivare aggiustamenti e calibrazioni costanti dei valori iniziali, del numero di punti di misura e della frequenza delle misure.

- Manutenzione:

Un'ispezione periodica dei componenti del sistema per il funzionamento del complesso operativo e per l'individuazione di divergenze tra i valori misurati e le tendenze storiche può essere prontamente eseguito per assicurare l'affidabilità sul lungo periodo. Un'ispezione straordinaria potrebbe diventare necessaria in taluni casi particolari (Rossi P. P., 1997).

2.1.1_ Strumentazione e sistemi di processamento dei dati

Per analizzare il comportamento di una struttura, vengono misurati i principali fenomeni che caratterizzano la sua risposta statica. Ogni misura può essere presa usando sia gli strumenti elettrici fissi connessi ad un sistema automatico di acquisizione sia con gli strumenti removibili per la lettura manuale. Una soluzione intermedia possibile consiste nell'utilizzo di trasduttori elettrici e di una piccola unità elettrica removibile per la lettura manuale.

2.1.1.1_ Movimenti delle fessure

Per il progetto di un sistema di monitoraggio, deve essere eseguito un dettagliato controllo dell'andamento e del posizionamento delle fessure per trovare quelle più rilevanti che potrebbero influire sul comportamento strutturale o rivelare l'evoluzione di eventuali dissesti in atto. Misurare i movimenti relativi delle fessure (apertura e scorrimento) è di gran lunga il metodo più semplice e più frequentemente adottato. Quando è richiesto un sistema automatico, vengono utilizzati indicatori elettrici permanenti. Questi strumenti sono collegati alla muratura usando speciali dispositivi sferici che eliminano gli effetti della curvatura della parete sul sensore. Il trasduttore di spostamento induttivo più utilizzato prende il nome di LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Quando si preferisce una soluzione basata sugli strumenti manuali, i movimenti delle fessure possono essere misurati usando un comparatore meccanico che viene posizionato su due piastrine metalliche incollate sui lati opposti delle fessure. Usando una disposizione a triangolo equilatero delle piastrine, si può determinare l'intero stato deformativo. Nelle prossime immagini (40 e 41) viene mostrato un comparatore meccanico removibile e la sua applicazione sul campo.

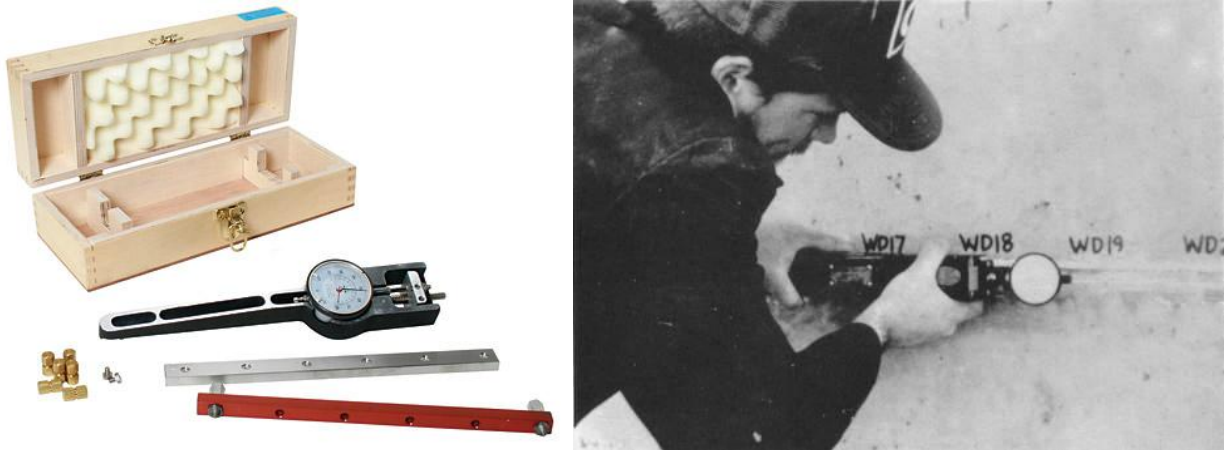


Figure 40 e 41 – Un comparatore meccanico a quadrante e la sua applicazione sul campo

2.1.1.2_Movimenti relativi delle strutture verticali

Estensometri a base larga sono utilizzati per misurare il movimento relativo orizzontale di strutture verticali (muri e colonne). Lo strumento è equipaggiato con un cavo di invar, tenuto in tensione da un peso, ed un trasduttore elettrico connesso con il sistema di acquisizione. Questi strumenti sono molto affidabili e l'installazione è molto semplice grazie alla loro grande flessibilità. Questi tipi di strumenti si possono installare per misurare le deformazioni di una struttura cilindrica sia in direzione radiale sia longitudinale.

I movimenti relativi della struttura possono anche essere misurati usando un estensometro a base lunga removibile connesso con un ancoraggio fissato sulla superficie della muratura.

2.1.1.3_Movimenti orizzontali assoluti

I movimenti orizzontali assoluti delle strutture verticali sono misurate grazie all'uso di un pendolo. Viene installata una piccola trave a sbalzo nelle parti superiori della struttura per agganciare il cavo del pendolo mentre, in basso, un'unità di lettura, equipaggiata con un telecoordinometro, misura le due componenti dello spostamento del cavo.

Il pendolo è molto interessante per monitorare le strutture alte (come le torri).

Il tipico progetto degli strumenti per monitorare le strutture alte vede un pendolo combinato con le misure delle deformazioni trasversali su diverse sezioni, misurate grazie all'utilizzo di un estensimetro a base lunga. Si utilizzano contemporaneamente anche i fessurimetri sulle fessure principali e gli indicatori termici. Quando non si può usare un pendolo fisso, se ne utilizza uno

rimovibile con un'unità di misura ottica posizionata su una piastra d'acciaio fissata durante la lettura e poi rimossa.



Figure 42 e 43 – Un estensometro meccanico a base lunga ed il suo utilizzo in sito

2.1.1.4_Asestamenti differenziali

Gli assestamenti differenziali delle strutture di fondazione sono misurati utilizzando contenitori livellometrici, che contengono liquido e comunicano l'uno con l'altro. Dentro ogni contenitore un trasduttore elettrico misura il livello del liquido.

Quando la struttura è affetta da assestamenti differenziali, è necessario anche installare un sistema di monitoraggio geotecnico che includa indicatori degli assestamenti e piezometri per analizzare la deformazione dei diversi strati del suolo in relazione alle variazioni del livello d'acqua.

2.1.1.5_Condizioni ambientali

Le deformazioni di una struttura devono essere collegate con le condizioni ambientali che principalmente sono: temperatura, livello di irraggiamento, velocità e direzione del vento. Le misurazioni della temperatura sono di gran lunga la cosa più importante a causa del suo effetto sulle deformazioni della struttura. Sia la temperatura dell'aria che il gradiente termico rispetto allo spessore del muro, il quale può essere misurato installando indicatori di temperatura dentro fori di piccolo diametro fatti nella muratura, sono molto importanti.

2.1.1.6_Acquisizione dei dati e sistemi di processamento

Gli strumenti installati nei diversi punti della struttura sono connessi ad un'unità periferica che converte il segnale analogico in digitale per essere poi processato dal computer. Le unità periferiche, raccomandate per ridurre la lunghezza dei cavi di ogni strumento, sono connesse ad una centrale di acquisizione dei dati e ad un computer per processare con le seguenti funzioni:

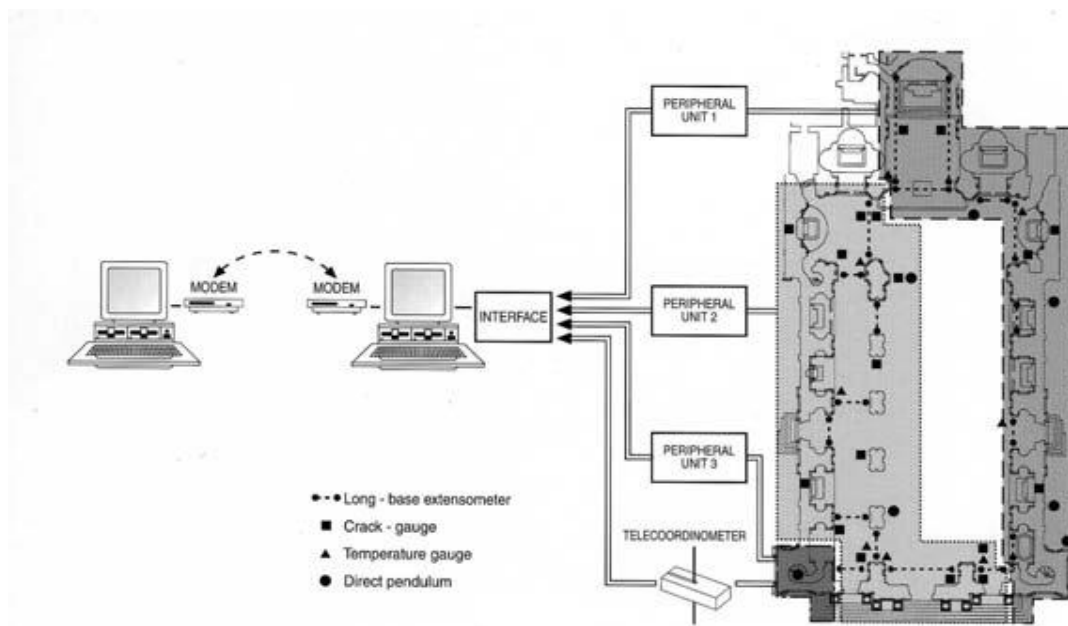


Figura 44 – Schema esemplificativo di un sistema automatico di acquisizione dei dati e di processamento degli stessi (Cattedrale di Noto, 1996)

- Acquisizioni periodiche dei dati ad intervalli di tempo fissati;
- Acquisizioni eccezionali su richiesta dell'operatore;
- Registrazione dei dati;
- Elaborazione dei dati e ricerca delle anomalie;
- Rappresentazioni grafica dei dati nel formato più opportuno.

I dati possono essere agevolmente trasferiti a grande distanza utilizzando un normale modem.

La figura (44) mostra schematicamente il sistema di monitoraggio installato da *Ismes* alla Cattedrale di Noto (Siracusa). Gli strumenti installati sulle strutture (quelle che restano dopo il collasso occorso nel Marzo del 1996) sono connessi a tre unità periferiche che raccolgono i dati dagli strumenti installati in tre zone differenti della Cattedrale. Le unità periferiche sono poi connesse ad un'unità centrale installata sulla torre campanaria. Un modem ed una linea telefonica permettono il trasferimento dei dati ai laboratori della *Ismes* a Bergamo e all'ufficio della Soprintendenza a Siracusa.

2.2_I metodi consolidati del monitoraggio statico delle fessure

2.2.1_Spie di gesso, segnali di cuspidi e di ventre

La progressione dell'ampiezza fessurativa, in corrispondenza del ventre, si accerta mediante apposite spie o biffe, traverse di malta con forma a doppia coda di rondine con la sezione minima corrispondente alla fessurazione. Queste vengono inserite nel vivo del muro o nello spessore dell'intonaco trasversalmente alla fessura stessa.

L'applicazione delle spie di malta a spessore di intonaco si effettua nel seguente modo:

- Si rimuove l'intonaco con cavo a pozzo e la base a doppia coda di rondine con larghezza minima in corrispondenza della frattura;
- Si lava e si mette a nudo la struttura muraria con spazzola metallica, in modo che la malta della spia vada a connettersi fisicamente e chimicamente con il vivo della struttura muraria, disponendo la malta in strato sottile (non più di una decina di millimetri) anche se così risulta incassata nella parete nel caso di grossi spessori dell'intonaco;
- Si scrive, infine, a lato della spia la data di apposizione (*Mastrodicasa S., 1993*).

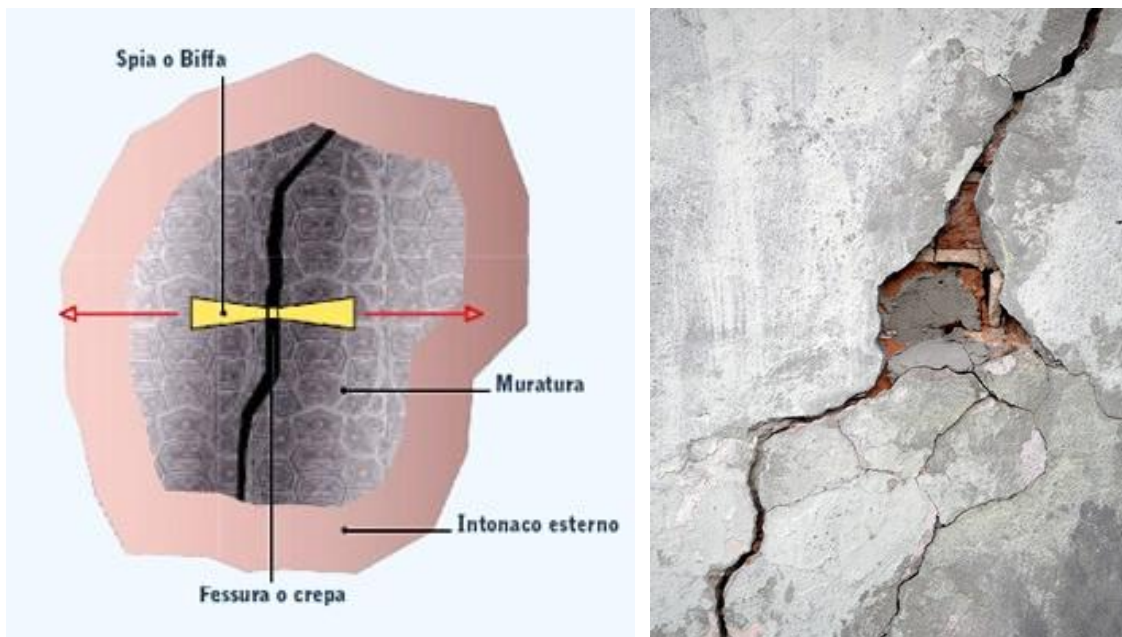


Figure 45 e 46 – Schema della corretta applicazione di una spia (a sinistra). Esempio reale di una spia di malta a spessore di intonaco (a destra)

Le spie non devono essere fatte con malta di cemento perché il ritiro del cemento durante la presa può determinare delle rotture indipendenti dai cedimenti. Nelle pareti interne asciutte sono consigliabili le spie di gesso o scagliola, o ancora meglio, di malta comune come l'intonaco; negli esterni, con paramento in pietra da taglio o intonacate, con malta idraulica o bastarda. Nella pietra da taglio, il cavo di alloggiamento della spia verrà praticato con scalpelli taglienti a mano; mai con scalpelli pneumatici che provocherebbero dannose vibrazioni nelle strutture.

Le spie di vetro sono criticabili perché il materiale di cui la spia è costituita deve essere meno resistente dell'intonaco o del materiale murario, per essere più sensibile alle segnalazioni del moto.

Se le fessurazioni sono semplici, senza accenni a decomposizione in rami multipli, la lunghezza delle spie può aggirarsi intorno ai venti centimetri; se sono multiple, o se le strutture sono vecchie, è necessario assegnare alle spie una lunghezza maggiore per evitare l'aggiramento fessurativo per il quale la frattura, abbandonando la sua sede, circonda la spia sfuggendo alla segnalazione.

La data di apposizione va scritta al di fuori della spia o, quanto meno, al di fuori della regione di probabile rottura.

Nell'applicazione delle spie è necessario insinuare il più profondamente possibile la malta nella frattura per aumentarne lo spessore. Infatti se questa fosse troppo sottile sarebbe esposta all'aria con due facce, esterna ed interna, anziché con la sola faccia esterna e potrebbe andar soggetta a fratture a causa di una precoce essiccazione.

Anche i rami capillari delle fessurazioni forniscono preziosi elementi di giudizio nel decorso del dissesto. Definendo le cuspidi mediante sottili segni rettilinei fatti a matita normalmente alla fessura e scrivendo a lato la data in cui è stato fatto quel segno, si possono apprezzare gli incrementi delle rotture nel tempo.

Negli studi non andranno nemmeno trascurati i segnali di ventre, sottili segni rettilinei, da datare anch'essi, tracciati per alcune coppie di punti corrispondenti dei cigli della regione ventrale. L'utilità dei segnali di ventre nel dissesto riguarda prevalentemente l'accertamento dei moti rotatori nel piano medio del solido.

Le spie, i segnali di cuspidi e di ventre debbono essere accuratamente sorvegliati a intervalli di tempo tanto più brevi, quanto più gravi sono i dissesti. I dissesti molto gravi denunciano già la loro natura e lo studio mediante le spie va abbandonato per la pronta adozione delle opere di consolidamento provvisorie e per lo studio dei consolidamenti definitivi.

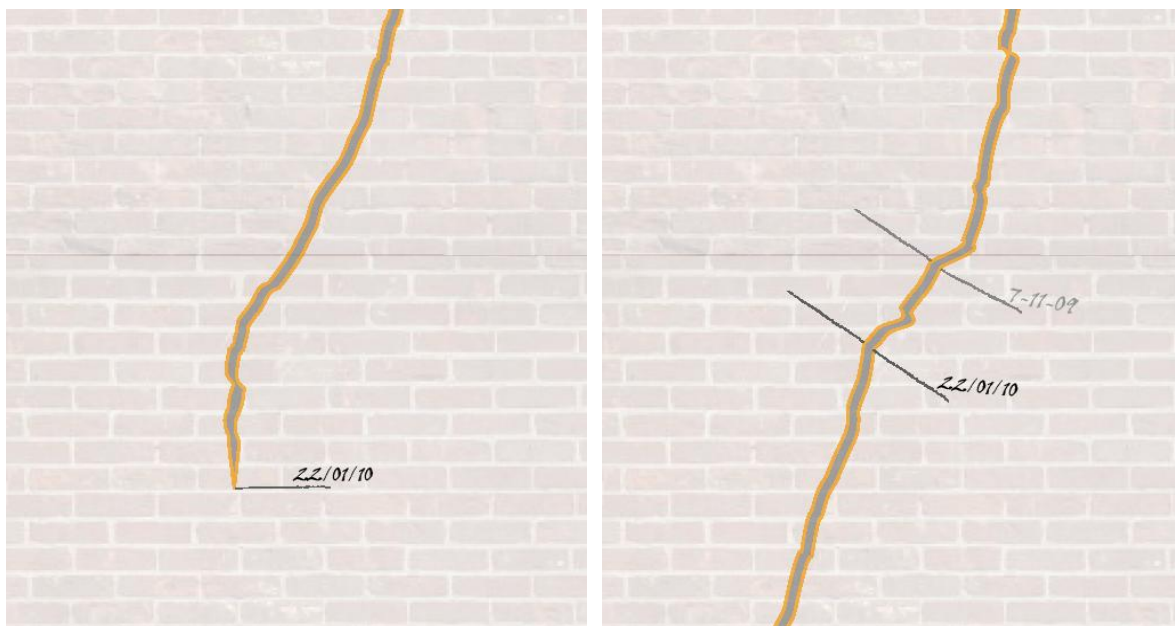


Figure 47 e 48 – Schema della corretta posizione dove fare i segnali di cuspide (a sinistra) ed i segnali di ventre (a destra)

2.2.2_Righelli graduati

I fessurimetri a piastra sono gli strumenti più semplici e immediati per il controllo delle lesioni su edifici o strutture. Disponibili in diversi modelli (per parete, angolo, pavimento, ecc..), sono tutti costituiti da due piastre sovrapponibili; quella superiore è trasparente e incisa da un retino, quella inferiore è graduata in millimetri in senso orizzontale e verticale, con lo zero posizionato all'incrocio delle rette mediane. Il fessurimetro viene posizionato a cavallo della fessura, con gli zero dei retini coincidenti. La direzione e l'entità dello spostamento reciproco delle parti (in millimetri) vengono letti direttamente sulla piastra graduata e possono eventualmente essere osservati e controllati nel tempo.

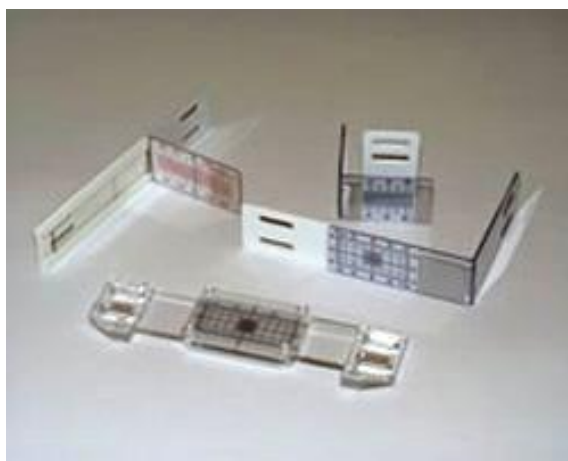


Figura 49 – Un set di tutti i righelli graduati disponibili

Vanno fissati al supporto con colla epossidica bicomponente o con resina polietere (reperibili in un comune ferramenta). Si possono fissare anche con tasselli di plastica tipo *fischer* (diametro 6 o 5) e viti inossidabili facendo in modo che la croce di riferimento coincida con lo zero dell'asse cartesiano della griglia.

Sulla piastrina va segnata comunque con un pennarello indelebile la data di posa. Dopo un congruo periodo di tempo (una settimana o un mese a seconda della velocità dei movimenti) si procede alla lettura dello spostamento avvenuto sull'asse delle x e y della griglia. Ovviamente questo fessurimetro è adatto a misure di movimento complanari alla parete.

2.2.2.1_Fessurimetro piano

Il fessurimetro piano è uno strumento semplicissimo da utilizzare ed economico. E' adatto per la determinazione degli spostamenti delle lesioni o delle fessure sulle superfici piane. Misura l'ampiezza dei movimenti sia in verticale che in orizzontale (rispettivamente scorrimento ed apertura nel caso di una fessura ad andamento verticale) con un'accuratezza circa del mezzo millimetro sino alla misura limite di 2 cm. Sono composti di materiale acrilico trasparente con l'incisione del retino millimetrato sulla piastra inferiore. Possono essere fissati tramite viti e tasselli oppure semplicemente incollati.

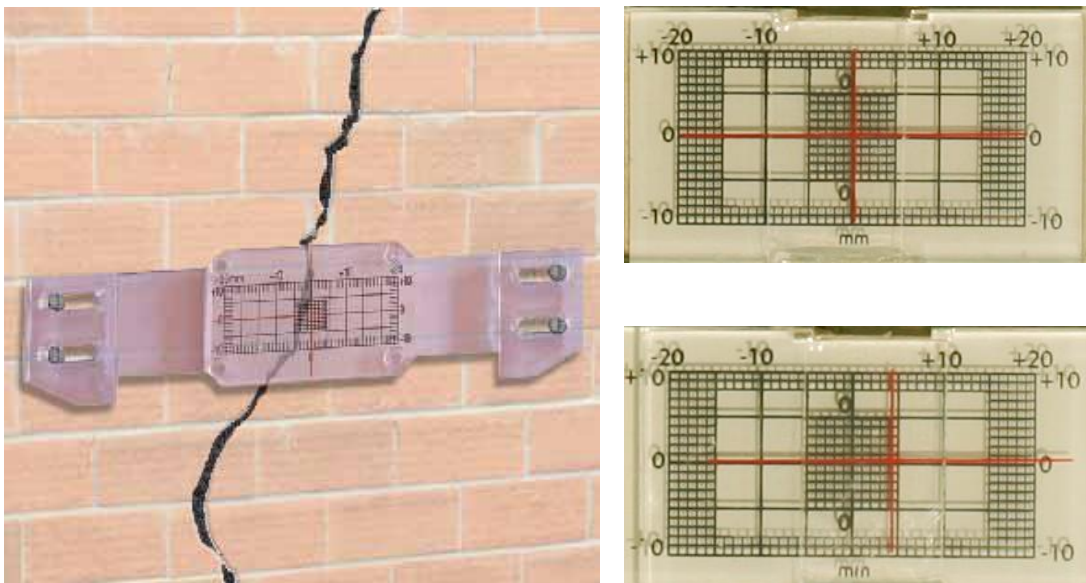


Figure 50, 51 e 52 – Un fessurimetro piano applicato (a sinistra). A destra due immagini dei retini millimetrati grazie ai quali avviene la lettura (in alto spostamento nullo; in basso spostamento di 4 mm verso destra)

2.2.2.2_Fessurimetro angolare

Le caratteristiche generali rimangono come quelle appena descritte anche per i fessurimetri angolari, i quali si differenziano per la particolare forma che consente il fissaggio delle due piastre su due superfici perpendicolari e non su una sola piana come la precedente. Con tutta evidenza questi strumenti sono utilizzabili solamente nel caso in cui si abbia la necessità di misurare gli spostamenti di due tronchi di muratura che presentano una discontinuità proprio nell'angolo. Si riescono ad utilizzare anche nel caso ci si trovi di fronte ad un angolo che varia di ampiezza lungo il suo sviluppo. L'accuratezza ed il fondo scala massimo di misurazione degli spostamenti rimangono attestati rispettivamente sul mezzo millimetro e sui due centimetri come nel caso visto in precedenza.



Figura 53 – Esempio di fessurimetri angolari

2.2.2.3_Fessurimetro per pavimenti

Il fessurimetro per pavimenti non si differenzia dagli altri se non per la tipologia degli spostamenti che deve misurare. Questo strumento verifica i movimenti verticali tra pavimento e muri oppure tra pavimento e pilastri. I materiali, il fissaggio, l'accuratezza ed il massimo spostamento misurabile sono i medesimo di quelli trattati nei paragrafi precedenti.



Figura 54 – Un esempio di fessurimetro per pavimenti

2.2.2.4_Fessurimetro per dislivelli

L'ultimo tipo che viene preso in considerazione è il fessurimetro per dislivelli. Questo strumento si differenzia da quelli precedentemente trattati perché misura l'ampiezza di dislivelli, quindi di movimenti che tendono a portare le due superfici, sulle quali sono fissate le due piastre, su due piani diversi. Quelli visti in precedenza invece misuravano traslazioni verticali ed orizzontali che però non modificavano la planarità delle superfici. L'utilizzo che se ne fa maggiormente è quello della verifica dei movimenti verticali tra due pavimenti, ma nulla vieta una sua applicazione su due superfici verticali, qualora se ne voglia misurare il movimento planare.



Figura 55 – Un esempio di fessurimetro per dislivelli

Anche geometricamente e matericamente lo strumento è differente (come possiamo notare nell'immagine 55), in quanto nessuno dei due componenti ha la necessità di essere trasparente per la misurazione che si deve eseguire. In aggiunta a questo un'ulteriore differenza sta nel fatto che le due piastre hanno uno sviluppo diverso tra loro: l'una parallelo alle superfici su cui le piastre sono applicate, l'altra normale ad esso.

Il fessurimetro per dislivelli da informazioni nel medesimo tempo anche circa l'apertura in corso tra le due superfici.

2.2.3 Comparatori

Il comparatore è uno strumento di misura utilizzato per misure di spostamento lineare. Lo strumento basa il suo funzionamento sulla lettura dello spostamento di un'asta cilindrica mobile che scorre all'interno di una guida tubolare. L'estremità dell'asta (chiamata tastatore o palpatore) è a contatto della superficie dell'oggetto sottoposto a misura. Una molla spinge costantemente l'asta verso l'esterno del corpo del comparatore, assicurando così che il tastatore sia perennemente in contatto con l'oggetto di misura. Quando la superficie si sposta nella direzione dell'asse dell'asta (avvicinandosi o allontanandosi), anche quest'ultima si muove. Un sistema di lettura amplifica e visualizza questo spostamento rendendo disponibile la misura.



Figura 56 – Un comparatore meccanico e gli strumenti accessori

I comparatori normalmente vengono realizzati con corse utili comprese tra 1 mm e 10 cm, mentre la risoluzione è normalmente millesimale (0,001 mm), anche se vengono ancora realizzati comparatori con risoluzione centesimale (0,01 mm). Oltre a questo valore bisognerà conoscere e provare anche il dato sulla precisione (o accuratezza) dello strumento adottato.

Le applicazioni di un comparatore sono molte, ovvero:

- Misurare lo spostamento di un oggetto;
- Rilevare errori di parallelismo;
- Verificare la planarità o la perpendicolarità di una superficie rispetto ad un piano di riferimento;
- Verificare la cilindricità di una circonferenza rispetto ad un asse;
- Rilevare differenze di quota tra un pezzo in esame ed un campione;
- Controllare deformazioni di un pezzo.

A seconda del sistema di lettura, il comparatore può essere classificato:

- Comparatore a quadrante, dove la lettura si esegue grazie ad un quadrante ad orologio;
- Comparatore digitale, dove la lettura si esegue direttamente su un indicatore elettronico digitale.

2.2.3.1_Comparatore a quadrante

In questo tipo di comparatore sull'asta viene realizzata una cremagliera; un pignone trasforma lo spostamento assiale in rotazione. Il pignone muove degli ingranaggi moltiplicatori collegati ad una lancetta (indice); quest'ultima, infine, viene montata in un quadrante ad orologio. Minimi spostamenti assiali dell'asta si traducono così in grandi movimenti rotazionali dell'indice. I comparatori vengono normalmente realizzati in modo che un giro completo di indice equivalga ad uno spostamento assiale di 1 mm. Nei comparatori di precisione un giro può corrispondere, invece, ad uno spostamento di soli 0,2 mm.



Figura 57 – Un comparatore meccanico a quadrante

Sulla circonferenza del quadrante viene stampata una scala opportunamente graduata. Il quadrante è mobile: può essere ruotato per regolare la scala ad un valore arbitrario rispetto all'indice. Spesso è presente una vite di bloccaggio che impedisce di ruotarlo accidentalmente dopo la regolazione iniziale. In alcuni comparatori, nella cornice del quadrante, vengono inseriti degli indici mobili destinati ad indicare minimi e massimi di una tolleranza prestabilita.

Quasi sempre il comparatore ha una corsa utile molto più grande di quella leggibile in un giro completo dell'indice, pertanto è presente un secondo quadrante (all'interno del quadrante principale) che ha il compito di contare i giri di indice. Nei comuni comparatori, un piccolo quadrante è destinato a contare i millimetri di spostamento, mentre nel quadrante più grande si possono apprezzare i centesimi di mm.

I comparatori a quadrante vengono realizzati con diversi accorgimenti per migliorare precisione e durata:

- I cinematismi vengono realizzati in acciaio inossidabile;
- I perni ed i supporti vengono lappati per ridurre i giochi;
- La cremagliera ed il pignone subiscono trattamenti di indurimento per ridurre l'usura.

2.2.3.2 Comparatore digitale

Il comparatore digitale funziona sullo stesso principio del comparatore a quadrante, con la differenza che in questo caso gli ingranaggi movimentano un piccolo encoder collegato ad un contatore elettronico. Minimi spostamenti dell'asta si traducono così in impulsi elettrici conteggiabili da un indicatore elettronico.



Figura 58 – Un comparatore meccanico digitale

L'evoluzione dell'elettronica ha permesso la realizzazione di indicatori miniaturizzati e dal consumo molto basso, tanto da poter essere facilmente alimentati da una comune batteria a bottone. I *display* dei comparatori sono normalmente realizzati con una risoluzione di 0,001 mm.

Gli indicatori possono avere numerose funzioni:

- Visualizzazione sia di letture metriche, che inglesi;
- Azzeramento della lettura in un punto arbitrario;
- Impostazione arbitraria di una quota;
- Inversione del verso di lettura;
- Impostazione e allarme quando la misura è fuori tolleranza;
- Collegamento seriale con PC per poter automatizzare le misure attraverso un apposito *software*.

2.2.3.3 Comparatori a tasto orientabile

Spesso è necessario fare misure su superfici interne, difficilmente accessibili da un'asta dritta. In questi casi viene usato un tipo particolare di comparatore: il tastatore è composto da una sfera montata in cima ad una leva che movimentata un eccentrico; quest'ultimo è palpato dall'asta del comparatore. La sfera viene posizionata sulla superficie dell'oggetto da misurare, con la leva disposta parallelamente a quest'ultima. Quando la superficie si muove ortogonalmente alla leva, questa muove l'eccentrico, e conseguentemente l'asta del comparatore. Una frizione permette di variare la posizione della leva rispetto all'eccentrico, in modo che la si possa orientare a piacere.



Figura 59 – Un comparatore meccanico a tasto orientabile

Con una realizzazione accurata di sfera, leva ed eccentrico, si possono ottenere comparatori precisi, ma che comunque hanno il problema di disporre di una corsa utile molto ridotta (inferiore al millimetro).

2.2.3.4_Deformometri meccanici

Il deformometro meccanico, o estensimetro rimovibile, è uno strumento di misura adatto per valutare variazioni di ampiezza (spostamento relativo) fra due punti, con una risoluzione dell'ordine del millesimo di millimetro. Questo strumento, forte della sua affidabilità e della ripetibilità delle sue misure, trova la sua maggiore applicazione nelle operazioni di monitoraggio dei quadri fessurativi o nelle prove di deformabilità con l'impiego di martinetti piatti. Si possono trovare deformometri di tipo meccanico o di tipo elettronico, a seconda del trasduttore che viene impiegato per la misura.

Il deformometro meccanico è costituito da una barra o tubo metallico alla cui estremità sono montati due perni ortogonali all'asse principale del tubo che servono per impugnare correttamente lo strumento, e due punte coniche da inserire in apposite basette per eseguire la lettura. Uno di questi perni è fisso, mentre l'altro, montato su un dispositivo di scorrimento meccanico, è libero di oscillare lungo l'asse principale dello strumento, con corse che variano tra i ± 2.5 mm e ± 5 mm.



Figura 60 – Il deformometro meccanico Huggenberger serie EDU (base 250 mm) ed i suoi accessori

I movimenti del perno mobile vanno ad agire su un comparatore analogico o digitale, che ne evidenzia gli spostamenti con risoluzione del millesimo di millimetro. L'utilizzo di strumenti di lettura analogici (quadrante con lancetta di indicazione) o digitali (*display LCD*) influisce solamente sulla semplicità, sulla rapidità di lettura e, in parte, sul costo.

Un requisito indispensabile del deformometro è quello di non risentire di eventuali oscillazioni anche minime della testina conica mobile durante la misurazione. L'obiettivo è di rendere più ripetibili le letture anche quando sono effettuate in momenti diversi o da operatori diversi. In questo senso un grande vantaggio si ricava proprio dalla sfera con la quale terminano le testine. Una sfera, infatti, aderisce in maniera sempre identica all'interno di un foro a forma conica, anche nel caso in cui, ad esempio, non venisse inserita in maniera perfettamente perpendicolare.

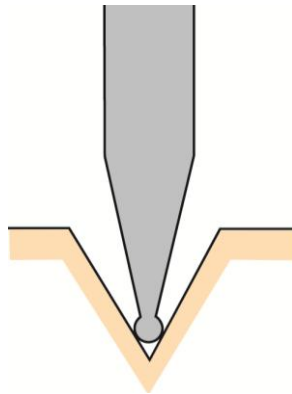


Figura 61 – Schema dell'innesto della punta del tastatore (a sfera) di un deformometro meccanico nella concavità di una basetta

Un'altra caratteristica importante dello strumento, e principalmente dei suoi accessori (quale dima di posizionamento e di verifica), è che vengano realizzati in un materiale con basso coefficiente di dilatazione termica.

Grazie all'utilizzo di acciai invar (o simili) si ottiene una ottima protezione contro il fenomeno della dilatazione termica dei materiali, mentre per quanto riguarda il problema delle oscillazioni fuori asse tutto è legato all'affinamento del processo produttivo, eliminando giochi e realizzando accoppiamenti tra le parti con livelli di tolleranza molto elevati.

Il deformometro è uno strumento che serve per valutare la variazione di spostamento tra due punti di misura che si trovano a cavallo di una fessura presente su una struttura, con basi di lettura che possono variare da 50 mm fino a 500 mm. I due punti di misura vengono identificati attraverso due basette, ossia piastrine in acciaio o in ottone con incisa una piccola cavità che attende la punta dei tastatori del deformometro. La sua forma dovrà essere ovviamente adatta a quella del tastatore che dovrà innestarsi al suo interno in maniera tale da garantire la massima stabilità nella

misurazione. Nei modelli più recenti di deformometri la punta conica del tastatore termina con una piccola sfera che ha proprio questo scopo.



Figure 62 e 63 – La dima di posizionamento e le basette nella fase di incollaggio

Con l’ausilio della dima di posizionamento in dotazione con lo strumento le due basette vengono rese solidali con l’elemento ad una distanza precisa mediante colle o resine a presa rapida, che garantiscono il fissaggio stabile ed eliminano la possibilità di distacchi. Lo spostamento tra le testine coniche del deformometro, posizionate nei fori presenti nelle basette, coincide proprio con lo spostamento delle stesse basette e viene misurato dal comparatore presente nello strumento.

La variazione di ampiezza rilevata è quindi conseguente all’eventuale spostamento delle basette a causa delle deformazioni dell’elemento preso in esame, e viene raffrontata con il valore iniziale dello zero.



Figura 64 – Una lettura con il deformometro Huggenberger serie EDU (base 250 mm)

L'impiego del deformometro, grazie ai suoi livelli di approssimazione, trova largo impiego nel monitoraggio dei quadri fessurativi, dove in presenza di situazioni di dissesto molto impegnative viene richiesto il rilievo anche degli spostamenti molto piccoli. Allo stesso modo il deformometro viene utilizzato per la rilevazione delle misure di convergenza a cavallo dei tagli in cui vengono inseriti i martinetti piatti.

Come in parte è già stato detto, gli strumenti accessori a corredo del deformometro sono:

- Dima di posizionamento;
- Dima di verifica o azzeramento;
- Basette in acciaio o ottone.



Figura 65 – Tutti gli strumenti presenti nella valigetta di un deformometro Huggenberger serie EDU II (base 250 mm)

Prima di esaurire la trattazione dei deformometri meccanici occorre fare delle ultime considerazioni su alcune differenze intercorrono tra un modello e l'altro. Il primo spunto riguarda i due principali modi di riportare gli spostamenti delle due parti al comparatore che, ovviamente, ha una lunghezza inferiore. I due modi più diffusi sono:

- Sistemi di leverismi;
- Sistemi a cursore.



Figure 66 e 67 – A sinistra un deformometro a leverismi. A destra un deformometro a cursore

Un altro aspetto da considerare in merito al funzionamento dei deformometri riguarda il tipo di allineamento che c'è tra le punte coniche da inserire nei fori delle basette ed i perni che servono per impugnare lo strumento e fare pressione durante la lettura. Sarebbe preferibile garantire sempre questo allineamento per rendere più equilibrata la gestione dei baricentri e, di conseguenza, più stabile la fase di misurazione. In effetti molti modelli presentano questa caratteristica. Ciò nonostante altri modelli presentano invece i perni alle due estremità dello strumento, fuori asse rispetto alle punte. Questa soluzione non conveniente, perché potrebbe generare delle flessioni sull'asta scorrevole, nasce dalla necessità di poter variare la distanza tra le punte per avere a disposizione più basi di misura.

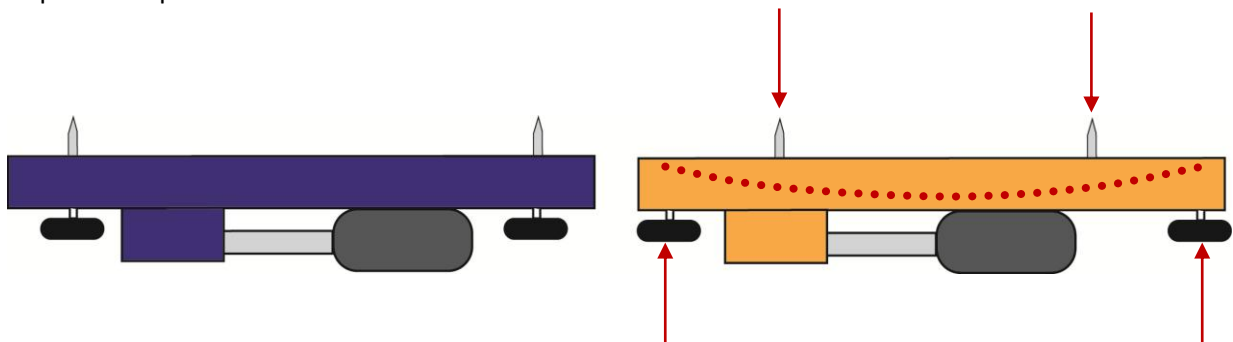


Figure 68 e 69 – A sinistra un deformometro con punte e perni allineati. A destra i perni sono più esterni delle punte e si potrebbero generare delle coppie di forze e, di conseguenza, delle flessioni sull'asta

Il deformometro meccanico, utilizzato correttamente, rileva valori di spostamento affidabili e precisi, i quali, una volta interpretati, forniscono all'operatore una serie di informazioni sullo stato qualitativo dell'elemento monitorato e quindi la sua evoluzione in atto.

L'utilizzo del deformometro rimovibile per rilevare i valori di spostamento tra due punti comporta però che l'operatore sia fisicamente presente in sito per ogni serie di rilevamento. Una prima difficoltà potrebbe essere rappresentata dall'ubicazione del dove si svolge il monitoraggio, anche

solamente per il lasso di tempo che occorre per raggiungerlo. Oltre a questo possibile problema bisogna considerare anche il grado di accessibilità del punto specifico di misurazione all'interno del manufatto. L'ipotetica fessura da analizzare potrebbe essere in un angolo poco facilmente raggiungibile per un operatore. E bisogna ricordare come per eseguire una lettura con il deformometro meccanico sia necessaria una buona stabilità da parte dell'operatore che deve eseguire la lettura. Per tutti quei casi dove si presentano aspetti di scarsa accessibilità sono pertanto preferibili gli strumenti fissi in collegamento con sistemi di acquisizione automatica.

2.2.3.5_Un particolare esempio di utilizzo di un deformometro meccanico insieme con tre basette disposte a triangolo equilatero

Un metodo particolare di utilizzo di un deformometro prevede il fissaggio di tre basette (in acciaio o in ottone) posizionate tra loro in maniera tale da formare un triangolo equilatero. Di queste tre basette due vengono incollate da una parte della fessura e la rimanente sull'altra parte. A questo punto non bisogna far altro che misurare nel tempo l'evolversi delle misure dei suoi lati per ottenere informazioni circa tutti i movimenti che interessano una fessura.

La disposizione delle piastrine secondo un triangolo equilatero permette di tenere sotto controllo non soltanto i movimenti della fessura, in apertura o chiusura, ma allo stesso tempo permette di controllare gli scorrimenti in direzione parallela dovuti ad eventuali azioni di taglio. Per posizionare correttamente le basette, viene utilizzata una particolare mascherina a geometria triangolare che consente di posizionare sempre alla stessa distanza i punti di misura.

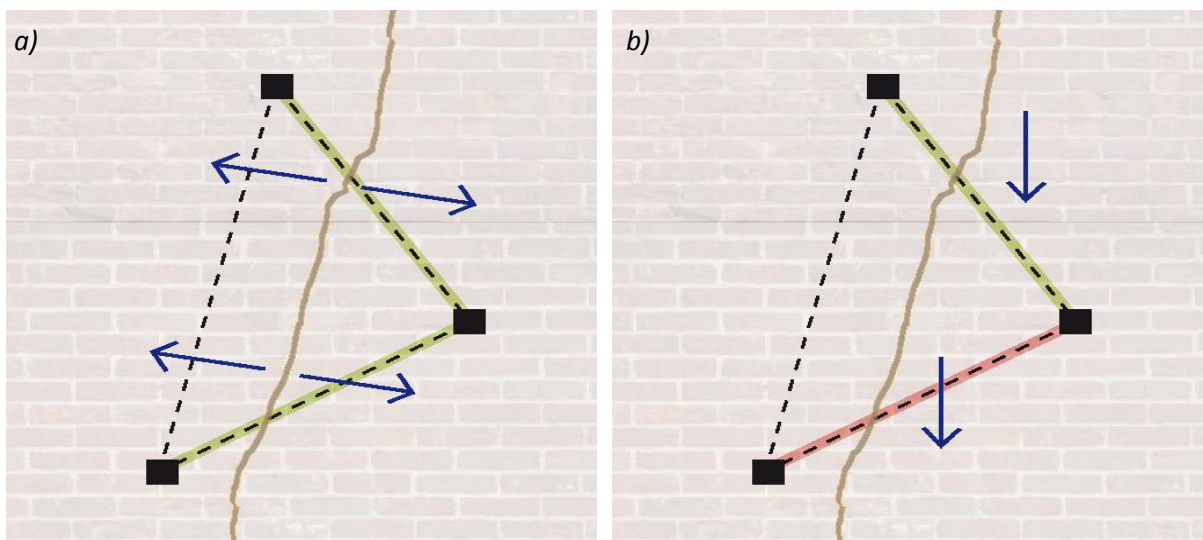
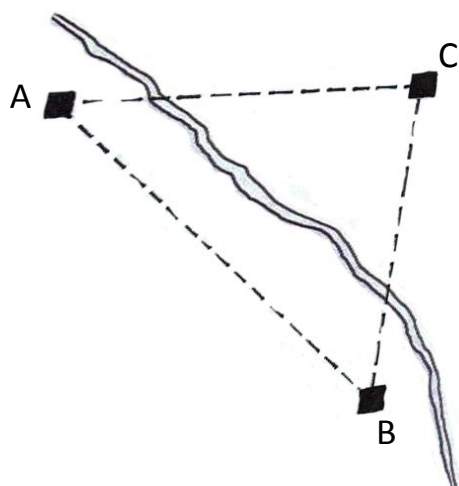


Figure 70 e 71 – Schematizzazione del metodo del triangolo equilatero per la lettura degli spostamenti. Nell'immagine a sinistra (a) viene rappresentato il caso di apertura della fessura perpendicolare al suo andamento principale. L'immagine a destra (b) invece rappresenta il caso di scorrimento parallelo di una delle due parti. Il colore verde sta per una misura che si va amplificando nel tempo, mentre il colore rosso sta per una misura che tende a ridursi.



- $A'B' - AB = \text{dilatazioni termiche}$
- $\frac{(A'C' + B'C') - (AC + BC)}{2} = \text{apertura o chiusura}$
- $\frac{A'C' - B'C'}{2} = \text{scorrimento parallelo}$

Figura 72 – Schema riassuntivo del procedimento per ottenere le informazioni sugli spostamenti che interessano la fessura monitorata. A', B' e C' fanno riferimento al triangolo una volta che è stato deformato dai movimenti della fessura

Grazie al fissaggio di tre basette si riescono ad ottenere tutte le informazioni necessarie per conoscere i movimenti che interessano la fessura. Più precisamente le differenze nel tempo del lato AB indicano i movimenti relativi alle dilatazioni termiche, o viceversa informano sulla temperatura della superficie fessurata. Tramite la semisomma degli altri due lati (AC e BC) si otterranno informazioni sull'apertura ed infine lo scorrimento verrà calcolato attraverso la semidifferenza dei due lati che sottendono la fessura e che in origine erano equivalenti. Per fare in modo che il lato "morto" (AB) non assorba parte dei movimenti di apertura e chiusura relativi alla fessura è preferibile, per quanto sia possibile, disporlo con andamento parallelo a quello della fessura.

La scelta di posizionamento delle basi inoltre deve tenere in considerazione aspetti sia caratteristici della lesione che si intende prendere in esame sia della superficie sulla quale si vogliono applicare le basi di rilevamento. Può accadere che, a causa delle dimensioni dei mattoni e dei giunti di malta, al fine di posizionare le basi solo sui laterizi, e non solo sul giunto di malta, si debba optare per una geometria a triangolo rettangolo con angolo pari a 90°.

In ogni caso si devono riportare in appositi grafici i dati relativi alle letture durante il periodo di osservazione. In un primo diagramma si esplicita l'andamento dell'apertura delle fessure nel tempo, mentre in un secondo diagramma si riporta lo scorrimento verticale tra i lembi della fessura. Con diversi colori si possono rappresentare le posizioni delle basi di misura. La scala del diagramma, che è composta da un passo dimensionale per un periodo di tempo unitario, deve essere scelta con buon senso in maniera tale da avere la miglior resa possibile dei risultati ottenuti. Avendo a disposizione i dati relativi ad almeno 18 mesi di letture è già possibile notare quali fessure hanno un'oscillazione maggiore nel loro movimento nel tempo e quali hanno un'oscillazione meno ampia, ma che potrebbe essere indipendente dal ciclo stagionale.

2.2.4_Trasduttori

Un trasduttore è un dispositivo che realizza una trasduzione, ovvero la trasformazione della grandezza fisica misurata in un'altra grandezza (in genere un segnale elettrico) di più semplice lettura e memorizzazione. Interessa l'elettroacustica, il campo delle misure, il campo delle apparecchiature di regolazione e di controllo. In pratica possono essere suddivisi in tre categorie, sebbene il principio funzionale relativo alla seconda ed alla terza sia sostanzialmente lo stesso.

In generale i trasduttori sono caratterizzati da un accoppiamento tra la parte meccanica oscillante ed il circuito elettrico, accoppiamento che può basarsi su un campo elettrico (per esempio microfoni elettrostatici e piezoelettrici, altoparlanti elettrostatici e a effetto corona), oppure su un campo magnetico, come i microfoni e gli altoparlanti a bobina mobile. Oltre alla fedeltà, il dato quantitativo caratteristico di un trasduttore è la sua sensibilità, che è il rapporto fra l'ampiezza (o il valore efficace) del segnale uscente e l'analoga grandezza del segnale entrante, in date condizioni di misura da specificare: per esempio nel caso dei microfoni, la sensibilità è misurata con il circuito elettrico di uscita aperto. I trasduttori di misura rientrano nella definizione iniziale, ma la conversione del segnale da una forma all'altra ha lo scopo di leggere la sua risposta alla variabile in ingresso.

Tra i più semplici trasduttori sono da considerare i tachimetri, i manometri, i dispositivi a termocoppia, a bimetallo, a termistori per misure di temperatura. Questi trasduttori non differiscono in sostanza dai trasduttori utilizzati nei sistemi di controllo e regolazione, nei quali, però, la misurazione, per esempio di una temperatura, non ha lo scopo di fornire come i primi il valore a un osservatore, bensì quello di costituire il segnale di entrata di un anello di reazione, la cui uscita è collegata all'organo di confronto.

I trasduttori elettroacustici convertono un segnale sonoro nel corrispondente segnale elettrico, o viceversa, mantenendo il più possibile eguale la forma d'onda dall'entrata all'uscita. Appartengono alla prima categoria i microfoni, i laringofoni, i sistemi che alimentano le testine di registrazione dei registratori magnetici; appartengono alla seconda categoria gli altoparlanti, i ricevitori telefonici, i vibratori ossei delle protesi uditive. I trasduttori elettroacustici sono molto spesso reversibili, ossia il principio del loro funzionamento è tale che la conversione del segnale può avvenire nei due sensi.

I trasduttori per controllo e regolazione possono essere classificati, in base al loro principio fisico di funzionamento, in :

- Resistivi;
- Capacitivi;
- Induttivi;
- Magnetostrittivi;

- Elettrodinamici;
- Piezoelettrici.

I trasduttori si possono anche dividere in attivi e passivi. Sono considerati passivi i resistivi, in quanto all'interno del trasduttore non viene generata né una forza elettromotrice, né una pressione, per azione diretta del segnale di ingresso; sono invece considerati attivi i trasduttori elettrodinamici e i trasduttori a coppia termoelettrica, atti alla misurazione di temperature.

I trasduttori utilizzati specificatamente per le misurazioni si suddividono in analogici e digitali. Sono analogici se alla grandezza di entrata variabile in modo continuo corrisponde una grandezza di uscita variabile anch'essa in modo continuo; sono digitali se ad ogni valore della grandezza di entrata corrisponde una grandezza di uscita rappresentata da un numero in cifre visibili su un quadro.

I trasduttori di spostamento digitali sono comunemente chiamati *encoder*, ed i più comunemente usati per misurare la posizione spaziale di un oggetto o per rilevarne lo spostamento sono:

- Encoder tachimetrico;
- Encoder incrementale;
- Encoder assoluto.

2.2.4.1_Trasduttori di spostamento potenziometrici

I trasduttori di spostamento potenziometrici, di tipo lineare o rotativo, sono dispositivi relativamente economici costituiti da un elemento resistivo, sul quale può scorrere un elemento mobile (detto cursore) collegato ad un'asta isolante che gli imprime lo spostamento da rilevare.

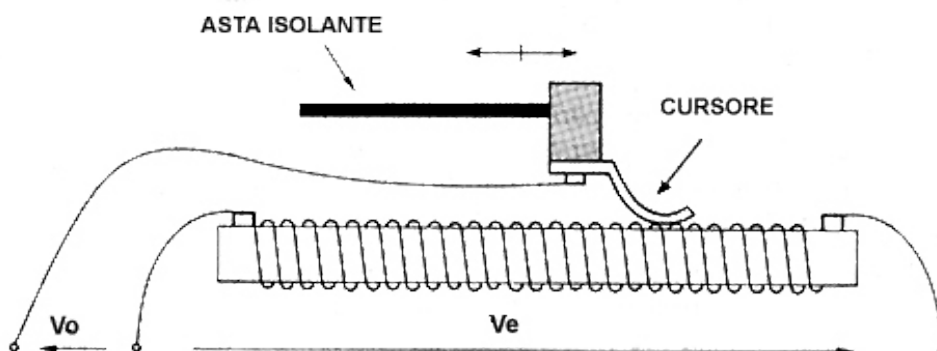


Figura 73 – Schema del funzionamento di un trasduttore di spostamento potenziometrico (www.superiorisesto.it)

La tensione di uscita V_o , prelevata sul cursore, è una frazione della tensione di eccitazione V_e e risulta direttamente proporzionale allo spostamento. I trasduttori potenziometrici a filo presentano una bassa resistenza di contatto e un basso coefficiente di temperatura. L' elemento resistivo è costituito da un filo che può essere di lega Ni-Cr, Ni-Cu, Ni-Cr-Fe o Ag-Pd avvolto su un substrato ceramico. La vita di questi strumenti è stimata in un massimo di 10^6 cicli meccanici. I trasduttori potenziometrici a strato (*film*) di carbone o metallo sono regolabili in modo continuo, ma il loro coefficiente di temperatura è più alto dei precedenti. I trasduttori potenziometrici a tecnologia ibrida, in cui l'elemento resistivo è costituito da uno strato di plastica conduttiva, riuniscono i vantaggi delle due tecnologie precedenti, ma ad un costo maggiore. Sono robusti ed hanno una durata stimata superiore a 5×10^6 cicli di lavoro. Il settore di impiego più comune dei trasduttori potenziometrici è quello della misurazione di spostamenti lineari e angolari con valori di fondo scala superiori rispettivamente a 10 mm e 10° .

2.2.4.2_Trasduttori di spostamento capacitivi

In questi trasduttori lo spostamento determina la variazione del valore della capacità di un condensatore. Tale variazione può essere realizzata modificando la superficie affacciata delle armature oppure la distanza fra di esse oppure ancora cambiando la costante del dielettrico interposto fra le armature.

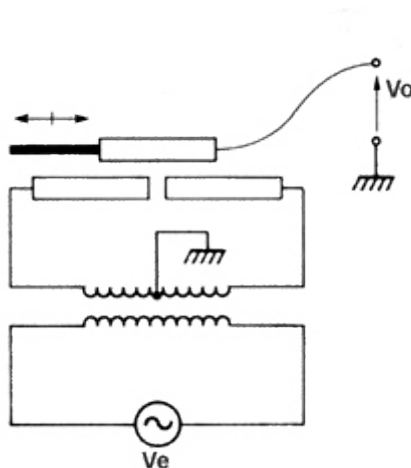


Figura 74 – Schema del funzionamento di un trasduttore di spostamento capacitivo a superficie variabile (www.superiorisesto.it)

Nella figura 74 è mostrato lo schema di principio di funzionamento di un trasduttore capacitivo a superficie variabile. Il dispositivo comprende tre armature uguali, due delle quali fisse ed una libera di spostarsi parallelamente alle altre. Le armature fisse sono alimentate in controfase da una

tensione di eccitazione V_e tramite un trasformatore a presa centrale. Quando l'armatura mobile si trova in posizione simmetrica rispetto alle altre due, la tensione di uscita V_o , indotta su di essa, è nulla. Un suo spostamento provoca viceversa un aumento della tensione con la stessa fase di quella presente sull'armatura avvicinata. Pertanto il modulo di V_o indica l'entità dello spostamento mentre la fase ne segnala il verso.

2.2.4.3 Trasduttori di spostamento induttivo

Il trasduttore di spostamento induttivo, noto anche come LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), è un dispositivo elettronico usato per misurare lo spostamento rispetto ad un punto. Il trasduttore è realizzato mediante un tubo composto da tre avvolgimenti disposti lungo lo stesso asse e con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile, normalmente caratterizzato da un'alta permeabilità magnetica.

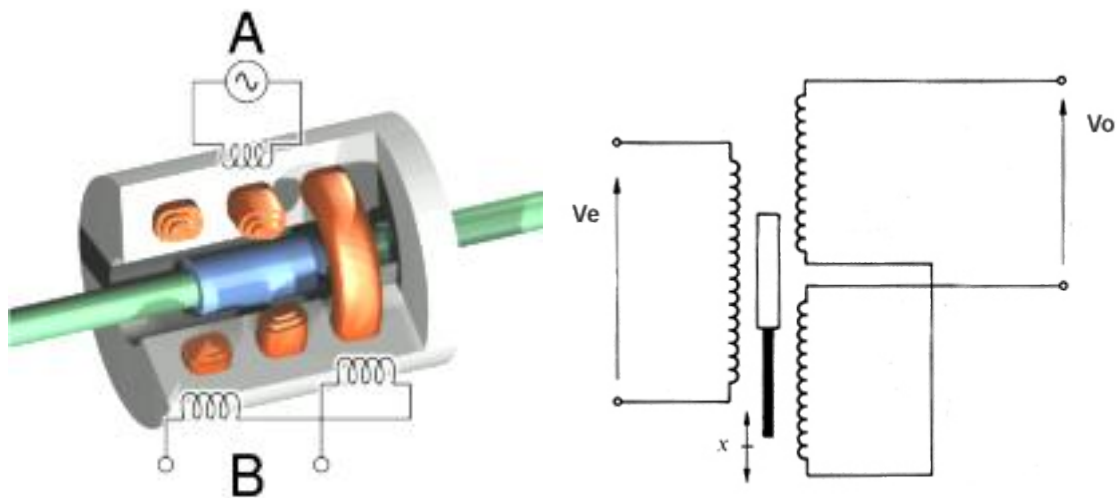


Figure 75 e 76 – Schemi del funzionamento di un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT) (www.superiorisesto.it)

L'avvolgimento centrale è detto primario e gli altri due secondari: quello primario è collegato ad un generatore di tensione AC, ai capi dei secondari invece si misura la tensione d'uscita. Quando è applicata la tensione al primario, sugli altri due viene indotta una forza elettromotrice per via delle mutue induzioni tra gli avvolgimenti. Quando il nucleo è al centro, la tensione indotta sugli avvolgimenti secondari è uguale e sfalsata di 180° , di modo che il segnale di tensione misurato tra i due sia nullo. Allo spostarsi del nucleo, invece, le mutue induttanze cambiano, e, a seconda che si sposti a sinistra o a destra, risulterà maggiore l'accoppiamento induttivo con il secondario

rispettivamente di sinistra o destra. Di conseguenza il segnale in uscita aumenterà proporzionalmente allo spostamento del nucleo, e sarà rispettivamente in fase o controfase con la tensione dell'avvolgimento primario. Da qui la misura dello spostamento.

2.2.4.4_Encoder tachimetrico

L'encoder tachimetrico è il più semplice tipo d'encoder. Questo dispositivo è in grado di rilevare la velocità angolare e lo spostamento angolare in situazioni in cui il movimento non s'inverte. Un encoder tachimetrico è costituito da una barriera fotoelettrica formata da un diodo all'infrarosso ed un *fototransistor*. Tra di essi è collocato un disco che presenta una serie uniforme di settori opachi e settori trasparenti.

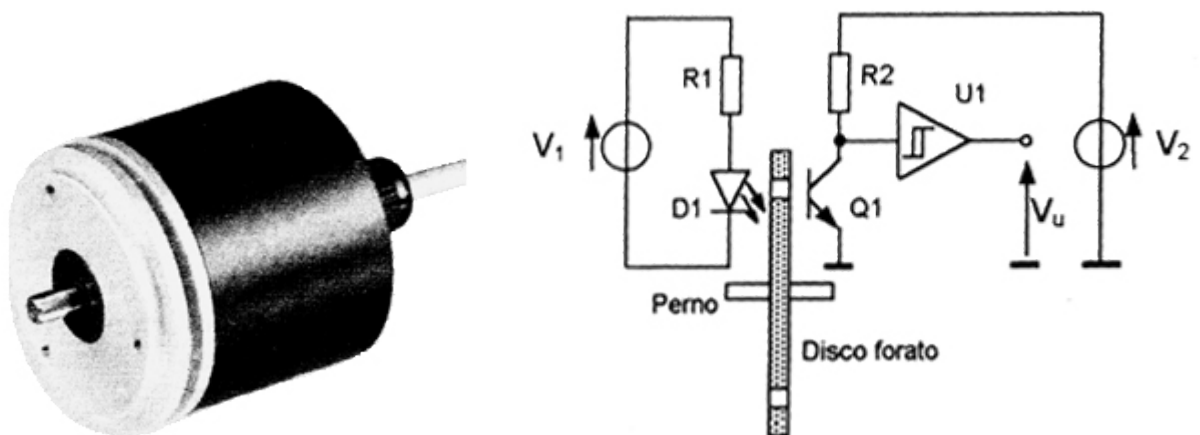


Figure 77 e 78 – Un encoder tachimetrico e lo schema del suo funzionamento

L'encoder tachimetrico viene inserito in un sistema in modo tale che il disco ruoti attorno allo stesso asse dell'albero da controllare. Il disco può essere di metallo, vetro o materiale plastico. I più utilizzati, sia per ragioni di stabilità sia di risoluzione, sono quelli di vetro sui quali le tracce sono riportate fotograficamente. Quando la base del *fototransistor* risulta illuminata questo si porta in condizione di saturazione: in uscita si avrà 0 logico. Quando, invece, la base è oscurata, il transistor è interdetto: l'uscita sarà 1 logico. U1 è un *buffer a trigger* di *Schmitt* che squadra la tensione d'uscita per ottenere una V_u con andamento rettangolare.

2.2.4.5_Encoder incrementale

L'encoder incrementale permette di rilevare velocità, spostamento angolare e il verso di rotazione di un albero. Il disco è costituito da una sola traccia. Ci sono tre barriere ottiche: A, B e C. Le barriere ottiche A e B sono disposte una accanto all'altra ad una distanza angolare:

$$D^\circ = nP + (P/4)$$

dove:

n = intero positivo;

P (passo) = $360^\circ / n$ divisioni (in modo che i segnali generati siano sfasati di almeno $1/4$ di periodo)

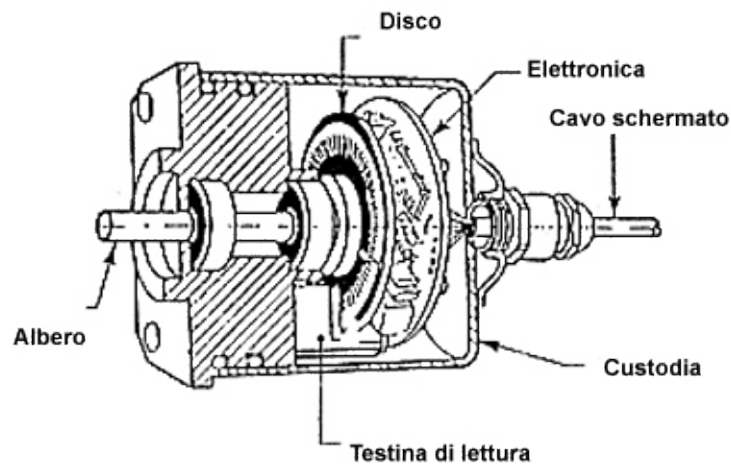


Figura 79 – Schema del funzionamento di un encoder incrementale

Il verso di rotazione si deduce osservando quale dei due segnali risulta in anticipo. La fase C fornisce un impulso ad ogni giro completo del disco.

Lo schema utilizzabile per la determinazione del verso di rotazione è il seguente:

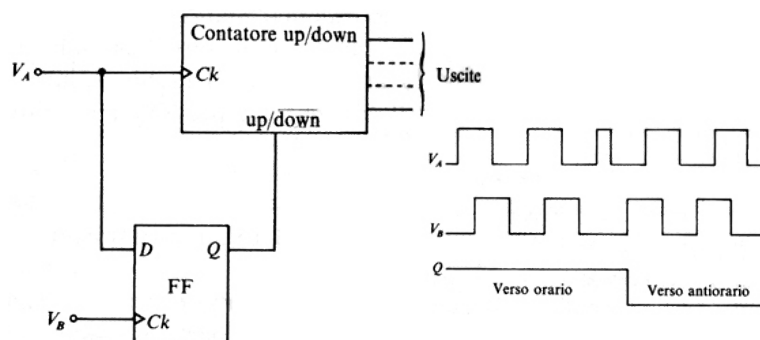


Figura 80 – Schema per la determinazione del verso di rotazione di un encoder incrementale (www.superiorisesto.it)

Il contatore riceve il segnale Va ed esegue il conteggio avanti o indietro a seconda dello stato di uscita del *flip-flop* FF . Il *flip-flop* commuta sul fronte di salita del *clock* costituito dal segnale Vb .

2.2.4.6_Encoder assoluto

Questo dispositivo è in grado di rilevare direttamente la posizione angolare di un albero e di mantenerla in caso di perdita di alimentazione del circuito.

E' fornito di un disco che presenta una serie di piste concentriche ognuna delle quali presenta zone trasparenti e zone opache disposte in modo particolare. Il disco è suddiviso in n piste (4 nella figura 81) e 2^n settori (16 in figura) a ciascuno dei quali è associato una sequenza binaria. Ciascuna pista è interessata da una barriera fotoelettrica. Per la codifica del disco si utilizza il *codice Gray*.

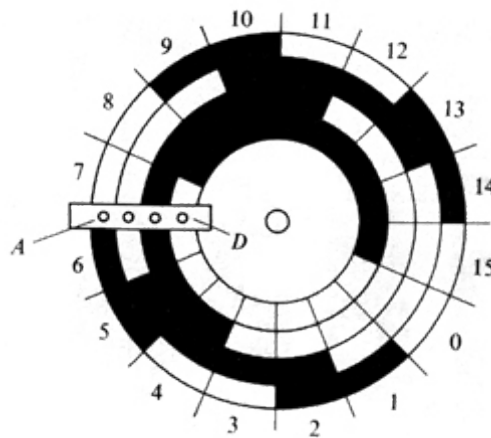


Figura 81 – Disco di un encoder assoluto con dati in codice Gray

In questo modo, nel passaggio tra un settore e l'altro, si ha la commutazione di un solo *bit*. Questo codice è utilizzato per ovviare ad errori di lettura. Infatti se si utilizza un disco codificato con codice binario può accadere che il cambiamento di due o più, nel passaggio tra uno stato e quello successivo, non avvenga allo stesso istante dando quindi un errore di lettura.

2.3_Un esempio di monitoraggio statico: il Torrazzo di Cremona

2.3.1_Descrizione dell'edificio

Il Torrazzo di Cremona, situato accanto al Duomo di Cremona, è uno dei simboli della città lombarda. Si tratta del campanile in materiale laterizio più alto d'Italia, secondo solo al campanile del Duomo di Mortegliano, in provincia di Udine (costruito però in calcestruzzo armato), e una delle torri campanarie più alte del mondo, superata solo dal Campanile della Cattedrale di *Landshut* (1432) in Baviera.

Da una lapide murata alla base del Torrazzo di Cremona se ne legge l'altezza (250 braccia e due onces cremonesi, che corrispondono a circa 110 metri). Da misurazioni più precise si sa che in realtà è alto 112,27 m e conta un totale di 502 gradini.

Scavi archeologici condotti agli inizi degli anni ottanta del novecento hanno dimostrato la presenza di strutture sottostanti la torre che erano atte a ricollegarla ad un'area cimiteriale posta nei pressi dell'antica cattedrale o a strutture romane antecedenti. La tradizione popolare vuole che la sua prima edificazione sia stata nel 754.

Si sono comunque distinte quattro fasi nello sviluppo della costruzione della torre: in una prima fase, risalente al terzo decennio del XIII secolo, la torre arrivava fino alla terza cornice marcapiano; in una seconda fase, tra il 1250-1267, fino al cornicione sottostante la quadrifora; una terza fase, attorno al 1284, come raccordo per la quarta e ultima fase, rappresentata dalla costruzione della guglia marmorea (ghirlanda) terminata entro il 1309.

Nel Torrazzo, al quarto piano, è stato in seguito incastonato uno degli orologi astronomici più grandi del mondo. Costruito da Francesco e Giovan Battista Divizioli (padre e figlio) tra gli anni 1583-1588, l'orologio rappresenta la volta celeste con le costellazioni zodiacali attraversate dal moto del sole e della luna (www.wikipedia.it).



Figura 82 – Vista notturna del Duomo di Cremona e del Torrazzo oggi

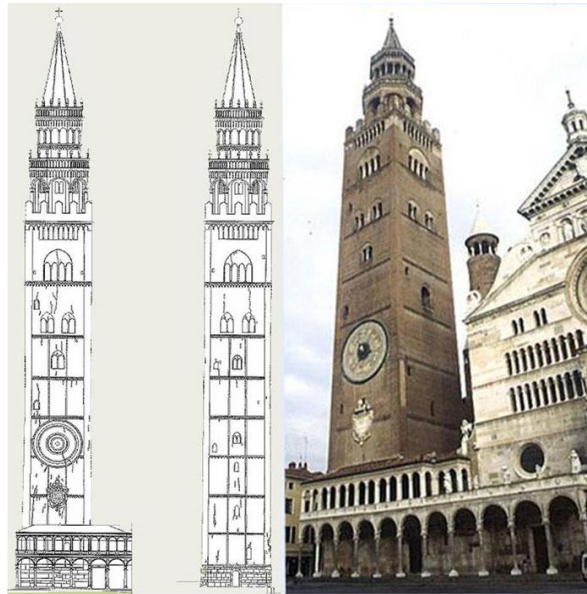


Figura 83 – Il Torrazzo di Cremona ed il suo quadro fessurativo

2.3.2_Introduzione al recente progetto di monitoraggio

Il controllo delle strutture, tramite sistemi di monitoraggio, oltre ad assumere una particolare importanza per la determinazione del comportamento statico e dinamico, deriva anche dall'esigenza di valutare l'evoluzione nel tempo del danno strutturale.

Il controllo statico permette di studiare gli spostamenti della struttura che hanno una lenta evoluzione nel tempo. L'andamento delle fessure, oltre che legato al cedimento del terreno, a carichi eccezionali, ecc., è soggetto a cicli giornalieri e a variazioni stagionali relazionabili alle variazioni termiche. Per questo il monitoraggio statico deve interessare lunghi periodi di tempo (non inferiori ai 18 mesi).

Il monitoraggio statico costituisce un'utile informazione per la conoscenza delle condizioni della struttura e per la progettazione di eventuali interventi di consolidamento.

Il controllo dinamico permette di misurare gli spostamenti provocati da carichi o eccitazioni di tipo dinamico. Attraverso il monitoraggio dinamico è possibile valutare la risposta della struttura alle vibrazioni. Le eccitazioni ambientali dinamiche (azione del vento, traffico, sismi, ...) sono di tipo passivo, mentre le vibrazioni forzate costituiscono un'eccitazione inerziale indotta. Entrambi i tipi di eccitazione permettono di verificare il comportamento strutturale e indirettamente l'integrità della struttura stessa. Il monitoraggio dinamico consente di calibrare i modelli numerici e di verificare i cambiamenti strutturali durante le fasi di un intervento.

Il sistema di monitoraggio strutturale installato sul Torrazzo ha lo scopo di caratterizzare il comportamento statico e dinamico della struttura. Oltre al monitoraggio statico del quadro fessurativo, è stato preso in considerazione l'effetto delle variazioni termiche. Per valutare l'effetto

delle eccitazioni ambientali e dinamiche sulla struttura, in particolare dell'azione del vento di cui è stata prevista la misurazione della direzione e della velocità, è stato disposto anche un sistema di monitoraggio dinamico in grado di acquisire i dati relativi alle accelerazioni e agli effetti sui cicli di aperture delle fessure.

2.3.3_Descrizione del sistema di monitoraggio

La principale caratteristica del sistema applicato al Torrazzo è la sua completa automatizzazione. La possibilità di gestire attraverso un computer le informazioni ha permesso di ricevere dati molto differenti tra loro in funzione di volta in volta del trasduttore utilizzato e del parametro da rilevare, di operare una selezione nell'atto dell'acquisizione e di segnalare eventuali anomalie nelle condizioni ambientali.

La problematica posta dal sistema di monitoraggio è stato il trattamento di segnali lentamente variabili nel tempo, come le temperature e i cicli di apertura delle fessure, e di altri di tipo dinamico, dovuti all'accelerazione della struttura soggetta ad eccitazioni ambientali quali il vento. Per permettere anche la correlazione tra i dati acquisiti, è stato progettato un doppio sistema di acquisizione: il primo dedicato ai segnali lentamente variabili ed un secondo dedicato ai segnali dinamici.

La complessità e la dimensione della struttura ha richiesto un elevato numero di punti di misura (circa 70) rendendo la concezione del sistema di acquisizione e del cablaggio una fase particolarmente difficoltosa (Condoleo P., 2003).

2.3.3.1_Il sistema di acquisizione

Le finalità con cui sono stati concepiti i due sistemi di misura interdipendenti installati sulla torre, si riferiscono all'acquisizione di segnali lenti e di segnali veloci.

Ci sono due computer a circa 35 m da terra in posizione baricentrica rispetto alla distribuzione dei settanta punti. Uno acquisisce con continuità (ad intervalli di 10 minuti) informazioni sulle grandezze fisiche lentamente variabili come le temperature e la dilatazione o la contrazione delle fessure; un secondo computer consente di acquisire i dati dinamici, come la velocità e la direzione del vento, con una frequenza di campionamento di 60 Hz ed è in grado di determinare i principali modi di vibrare della struttura. Il primo, impiegato per l'acquisizione dei segnali lenti, è collegato a due sistemi periferici "Field point" di tipo FP-RTD-122 e FP-AI-110. I moduli *Field point* sono collocati alla quota di

15 m da terra (nella stanza dei contrappesi) e alla quota di 58 m nella cella campanaria e raccolgono i cablaggi dei trasduttori LVDT e RTD. Questi moduli hanno la possibilità di avere venti canali di acquisizione ciascuno e controllano e acquisiscono i segnali di apertura delle fessure, provenienti da trasduttori LVDT, e le temperature, provenienti da trasduttori RTD. Il segnale, acquisito dai moduli *Field point* dopo essere stato convertito da analogico a digitale, è inviato al computer per l'acquisizione lenta tramite un collegamento seriale RS 485. I dati per l'acquisizione dei segnali lenti, vengono memorizzati con un intervallo di campionamento di dieci minuti, andando a formare dei *file* storici a base giornaliera da cui è possibile ricostruire il comportamento statico della torre nel tempo.

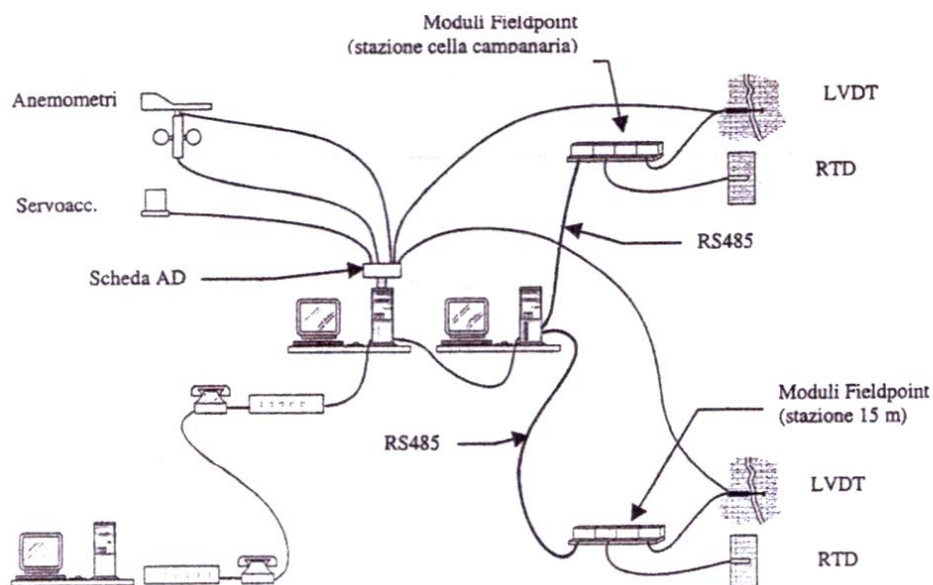


Figura 84 – Schema dell'organizzazione del sistema di acquisizione sul Torrizzo di Cremona

Al computer predisposto per acquisire i dati veloci (accelerazioni, direzione e velocità del vento) è stata applicata una scheda di conversione analogico-digitale (scheda AD di tipo *PCI 6033E* a 64 canali) a cui convergono i cablaggi di ogni singolo trasduttore (servoaccelerometri, anemometri e bandierine segnamento). Per valutare istantaneamente il comportamento della struttura, in determinate condizioni di eccitazione dovute ad eventi dinamici particolarmente significativi, sono stati duplicati i segnali che provengono dai trasduttori che controllano l'andamento delle fessure (LVDT) e fatti convertire dalla scheda di conversione AD.

Per la diagnostica, ed in aggiunta al sistema, è stato affiancato ai computer, un analizzatore di spettro bicanale che ha consentito di analizzare i primi dati ottenuti. Inoltre, per verificare il corretto funzionamento dei servoaccelerometri, sono state installate delle centraline analogiche che vengono costantemente tenute attive.

Il sistema è stato protetto mediante un'unità di *back-up UPS* per prevenire malfunzionamenti o danni provocati da improvvise cadute di tensione.

Data la complessità e l'estensione dei cablaggi è stata posta una particolare attenzione all'interferenza dovuta al rumore. Per questo è stata realizzata una linea indipendente di alimentazione e di messa a terra che dal basamento raggiunge la Ghirlandina (71 m da terra) e a cui sono stati successivamente collegati gli alimentatori di ogni elemento del sistema di monitoraggio.

Per controllare il perfetto funzionamento del sistema e per accedere e scaricare i dati acquisiti, i due computer sono stati connessi tramite una rete locale ed hanno la possibilità di essere raggiunti tramite connessione remota, via modem e linea telefonica. La possibilità di accedere ai dati tramite un qualunque computer, opportunamente predisposto e configurato, presso la sede del Politecnico di Milano garantisce il monitoraggio e il controllo continuo dell'edificio anche in corrispondenza di eventi ambientali improvvisi ed eccezionali (Condoleo P., 2003).

STRUMENTAZIONE STATICA

<i>Strumento</i>	<i>Numero strumenti:</i>
LVDT	L1-L15
Termoresistenze	T1-T22
Telecoordinometro a luce laser	TLC

STRUMENTAZIONE DINAMICA

<i>Strumento</i>	<i>Numero strumenti:</i>
Servo Accelerometri	A1-15
Anemometri	V1-4

Tabelle 1 e 2 – Numero e denominazione degli strumenti applicati sul Torrazzo per il monitoraggio statico e dinamico

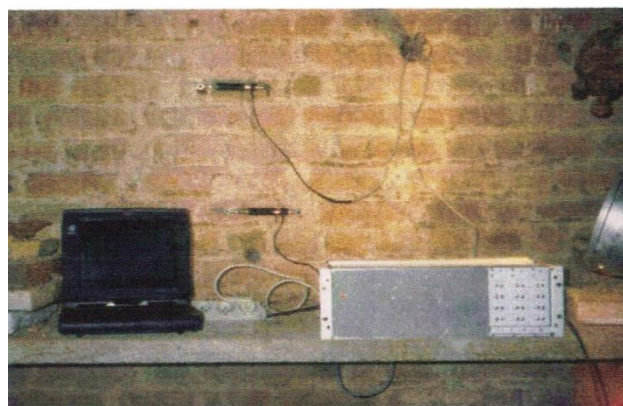


Figura 85 – Centralina di acquisizione dei dati statici e dinamici

2.3.3.2_ Il sistema di misura per i segnali lenti

I punti di misura relativi alle variazioni dimensionali delle fessure e al rilevamento delle temperature sono distribuiti in tutta la struttura. Questa distribuzione degli strumenti, non raggruppata in aree limitate della torre, ha reso necessaria la collocazione dei moduli *Field point* in due postazioni differenti. Ogni modulo *Field point*, oltre a contenere gli elementi di cablaggio, riceve un'alimentazione di rete, il riferimento di massa su linea dedicata e la linea RS 485 che li collega al computer posto a 35 m da terra (nella stanza del laboratorio).

2.3.3.3_ Trasduttori di spostamento LVDT

Come trasduttori di spostamento monoassiali sono stati scelti gli LVDT (*linear Variable Differential Transducer*, con molla di ritorno e soffietto di protezione; *Leane Internationale*), in quanto offrono maggior stabilità e precisione rispetto ai trasduttori che funzionano secondo il principio della resistenza. Il principio di funzionamento degli LVDT è l'induzione: una bobina primaria, eccitata tramite un'alimentazione a corrente continua, è posta in prossimità ad un piccolo nucleo (pistoncino) di ferro, libero di muoversi senza contatti, che scorre in funzione dello spostamento.

Il segnale in uscita, tuttavia, per essere utilizzato necessita di una demodulazione e filtrazione (*passa-basso*). I trasduttori utilizzati nel sistema di monitoraggio del Torrazzo hanno al loro interno un sistema elettronico completo (demodulatore, amplificatore e filtro passa-basso) che facilita le operazioni di acquisizione (Condoleo P., 2003).

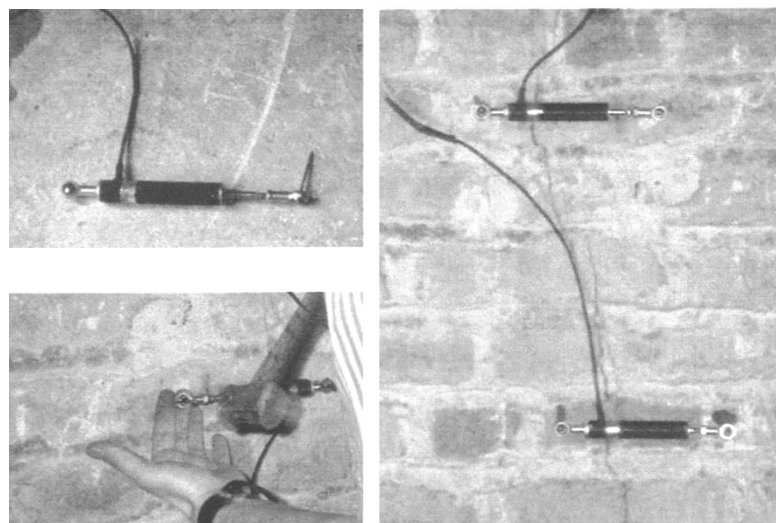


Figure 86, 87 e 88 – Trasduttori induttivi di spostamento (LVDT) prima dell'applicazione, durante l'applicazione (in basso a sinistra) ed una volta in funzione (a destra)

La tensione in uscita nella posizione di zero elettrico, è idealmente nulla. In realtà il voltaggio acquisito dai secondari è leggermente fuori fase rispetto all'eccitazione iniziale. Questa differenza di sensibilità è una caratteristica propria di ogni trasduttore. Per convertire il segnale restituito dal trasduttore (tensione in uscita) in spostamento, è stata calcolata una costante di taratura per ogni LVDT.

La tensione che ha alimentato la strumentazione è posta pari a 15 Volt in conformità alla tensione utilizzata nel sistema di monitoraggio installato sulla torre.

La costante di taratura è data dalla relazione tra la tensione in uscita e lo spostamento corrispondente:

$$S/T_u = K$$

dove:

S = spostamento [mm];

T_u = tensione [volt].

Il trasduttore di spostamento è stato posizionato su uno strumento campione, un calibro elettronico, detto anche micrometro (*Mitutoyo–digimatic series 164*), in grado di generare uno spostamento predefinito. Dopo aver ricercato lo zero elettrico, tramite una scheda di acquisizione che ha permesso di rilevare la tensione in uscita di ogni strumento, è stata azzerata la lettura digitale del micrometro. La lettura della tensione in uscita è stata effettuata per intervalli di spostamento prestabiliti, pari a 0.25 mm.

Per il sistema di acquisizione dei segnali lenti installati sulla torre, sono stati utilizzati tredici trasduttori con una estensione nel campo di misura di ± 2.5 mm, ad eccezione di due strumenti aventi una corsa di ± 5 mm, posizionati in corrispondenza della fessura passante a quota 55 m, per la quale non si escludono spostamenti di notevole entità.

L'alimentazione dei trasduttori LVDT è posta all'interno dei moduli di acquisizione *Field Point*, in cui è stato previsto un canale che permette di verificare il valore della tensione immessa, al fine di depurare il segnale di lungo termine da eventuali variazioni associate a oscillazioni e cadute della tensione di alimentazione stessa.

<i>Prospetto</i>	<i>Quota</i>	<i>Localizzazione</i>	<i>Strumen.</i>	<i>Numero</i>
Ovest	Da+14,00a+20,70m	Stanza dei contrappesi (interno)	2 interno	L1; L2
Est	Da+15,70a+16,60m	Superficie muraria esterna – monofora (esterno)	1 esterno	L3
	Da+15,70a+16,60m	Vano scala – monofora (interno)	1 interno	L4
Nord	Da+17,70a+18,30m	Superficie muraria esterna – monofora (esterno)	1 esterno	L5
	Da+17,70A+18,30m	Vano scala – monofora (interno)	1 interno	L6
Ovest	Da+20,50a+21,70m	Vano scala (interno)	1 interno	L7
	+52,50m	Corridoio bifore (interno)	1 interno	L8
Sud	+52,00m	Mensola corridoio bifore (interno)	1 interno	L9
Est	+52,50m	Corridoio bifore (interno)	1 interno	L10
	+52,50m	Corridoio bifore (interno)	1 interno	L11
	+52,00m	Mensola corridoio bifore interno)	1 interno	L12
Nord	+52,00m	Mensola corridoio bifore (interno)	1 interno	L13
Ovest	+55,00m	Vano scala (interno)	1 interno	L14*
	+55,00m	Vano scala (interno)	1 interno	L15*

Tabella 3 – Localizzazione di tutti i trasduttori LVDT installati

Durante l'installazione dei trasduttori si è cercato di rendere lo strumento solidale con la muratura, per garantire la stabilità a lungo termine dei vincoli meccanici, realizzati tramite blocchetti di alluminio e collante rigido bicomponente.

Per proteggere la strumentazione da eventuali interventi esterni accidentali, il cavo in uscita del trasduttore è stato fissato alla muratura mediante due fascette in plastica, disposte opportunamente per resistere allo strappo, e l'intera strumentazione è stata protetta mediante una calotta semicilindrica in *plexiglass* trasparente (Condoleo P., 2003).

2.3.3.4_ Trasduttori di temperatura RTD

Il monitoraggio delle variazioni di temperatura della struttura è effettuato mediante termoresistenze RTD (mod. *PT 100* ohm a 0°C, fornito dalla ditta *Tersid*). Il funzionamento di questo trasduttore si basa sul principio della resistenza. Il sensore è costituito da un filamento composto da un unico metallo (platino) la cui resistenza elettrica è funzione della temperatura a cui si trova il filamento stesso: al variare della temperatura, varia anche la sua resistenza elettrica.

La conformazione e le dimensioni ridotte del trasduttore garantiscono un perfetto contatto con la muratura. Infatti è possibile inserire il sensore direttamente nella muratura mediante un foro di dimensioni opportune evitando in questo modo l'influenza sulla misura della temperatura dell'aria. Questo strumento è molto sensibile, stabile nel tempo ed ha un grado di precisione molto elevato.



Figura 89 – Una termoresistenza RTD modello PT 100

L'installazione delle termoresistenze è stata finalizzata non solo al rilevamento delle variazioni di temperatura dovute all'irraggiamento solare sulla muratura esterna della torre e alla valutazione dell'influenza di queste variazioni sullo stato tensionale della muratura, ma anche alla registrazione delle variazioni di temperatura tra parete esterna e parete interna della struttura, allo scopo di correlare tale variazione all'andamento del quadro fessurativo.

L'installazione delle ventidue termoresistenze è avvenuta mediante l'inserimento di testa all'interno di un foro eseguito con l'ausilio di un trapano, della parte sensibile della sonda nella muratura, per una profondità di circa 10 cm. Per fissare lo strumento e per isolarlo dalla temperatura dell'aria contenuta dal foro stesso, è stato utilizzato un collante rigido buon conduttore di calore (plastilina). Il cavo dello strumento è stato fissato alla muratura mediante due fascette in plastica, disposte opportunamente per resistere ad accidentali strappi (Condoleo P., 2003).

Prospetto	Quota	Localizzazione	Strumen.	Numero
Nord	+17,50m	Superficie muraria esterna - monofora	1 esterno	T1
sud	+18,50m	Superficie muraria esterna	1 esterno	T2
	+18,50m	Stanza dei contrappesi	1 interno	T3
ovest	+20,00m	Superficie muraria esterna, monofora	1 esterno	T4
est	+22,00m	Superficie muraria esterna ,strombatura della monofora	1 esterno	T5
	+22,00m	Stanza dei violini	1 interno	T6
ovest	+50,70m	Corridoio bifore, strombatura	1 esterno	T7
	+50,70m	Corridoio bifore	2 interno	T8;T9
	+50,70m	Stanza del laboratorio,strombatura della porta	1 interno	T10
sud	+50,00m	Corridoio bifore, strombatura	1 esterno	T11
	+50,00m	Corridoio bifore	2 interno	T12;T13
	+50,00m	Stanza del laboratorio, strombatura della monofora	1 interno	T14
est	+50,00m	Corridoio bifore, strombatura	1 esterno	T15
nord	+50,00m	Corridoio bifore, strombatura	1 esterno	T16
Spigolo S-O	+65,10m	Stanza delle campane	1 interno	T17
Spigolo N-E	+65,10m	Stanza delle campane	1 interno	T18
sud	+65,10m	Superficie esterna, strombatura della Loggia	1 esterno	T19
ovest	+65,10m	Superficie esterna, strombatura della Loggia	1 esterno	T20
nord	+65,10m	Superficie esterna, strombatura della Loggia	1 esterno	T21
est	+65,10m	Superficie esterna, strombatura della Loggia	1 esterno	T22

Tabella 4 – Localizzazione di tutte le termoresistenze RTD installate

2.3.3.5_Telecoordinometro

Per misurare lo spostamento orizzontale della struttura è prevista l'installazione di un telecoordinometro laser. Questo trasduttore permette di verificare se lo spostamento del baricentro della struttura (pari a 21 cm in direzione nordest) è dovuto alla rastremazione della muratura oppure ad una inclinazione della torre. Inoltre sarà possibile verificare in che modo la presenza di alcune sollecitazioni, come l'azione del vento e la variazione termica, influenzano ed amplificano lo spostamento orizzontale della struttura.

Il telecoordinometro si basa su una tecnica ad inseguimento: un raggio laser, reso solidale con il terreno tramite tripode con regolazione fine di posizione, insegue un bersaglio ottico, reso solidale alla struttura della torre in corrispondenza della merlatura tramite una struttura in acciaio, nello spigolo nordest, al livello del piano della merlatura della Ghirlandina (71 m). Il generatore del raggio laser è posizionato alla base della torre e reso solidale al terreno di fondazione. E' stata condotta una verifica e predisposto un rilievo del locale caldaia localizzato nel cortile del Torrazzo ed in prossimità

del prospetto est. Questa stanza infatti si trova al di sotto del piano di calpestio del cortile e, se non venisse analizzata, potrebbe interferire con il sistema di misurazione.

I cablaggi predisposti nel progetto prevedono l'alimentazione dalla stanza del laboratorio con una coppia di cavi sia al bersaglio ottico che alla postazione laser per l'acquisizione dei dati (Condoleo P., 2003).

2.3.3.6_Il sistema di misura per i segnali veloci

I cablaggi della strumentazione per i segnali dinamici sono collegati direttamente alla scheda di acquisizione analogico-digitale, installata sul computer dedicato a ricevere i segnali veloci e posto nella stanza del Laboratorio (a circa 35 m da terra).

Avendo predisposto il riferimento di massa su linea dedicata per i computer, per l'alimentazione e per la strumentazione di misura, è stato possibile ricevere i segnali di tensione, senza ricorrere a trasmissioni in corrente. La scelta è stata determinata anche dalla considerazione che la torre è posta in un ambiente isolato con scarsa probabilità di incorrere in una sovrapposizione di rumore elettrico ambientale. Inoltre i cavi utilizzati per i cablaggi sono di tipo esapolare schermato, quindi in grado di fornire la massima garanzia di reiezione al rumore (Condoleo P., 2003).

2.3.3.7_Anemometri e bandierine segnamento

Il sistema di misura per il monitoraggio del vento è stato progettato utilizzando una strumentazione composta da quattro anemometri a coppe, che misurano la velocità del vento in base alla tensione generata dalla rotazione delle coppe, e quattro bandierine segnamento direzionali che misurano la direzione del vento tramite la resistenza elettrica generata dalla rotazione delle bandierine stesse. L'anemometro è stato montato in asse e in posizione simmetrica rispetto al trasduttore di direzione (bandierina).

Data l'alta probabilità di incontrare interferenze nel rilievo del segnale, il progetto ha avuto l'obiettivo di ottenere dei segnali che fossero poco influenzati da effetti di interazione tra il vento e la struttura o tra il vento e le strutture adiacenti alla torre.

Gli anemometri sono stati collocati a circa 85 m di altezza, in corrispondenza della stanza delle ore. È stata scelta una quota così elevata per evitare l'influenza dei vicini edifici che circondano l'intera struttura. Per evitare l'effetto di bloccaggio dovuto alla torre stessa, gli anemometri sono stati collocati in corrispondenza della sezione di mezzera delle colonnine binate: è stata sfruttata l'esilità delle colonnine che presentano una ridotta sezione frontale.

Il punto di misura è stato posto lontano dalla torre di circa 4 metri, a sbalzo rispetto ai prospetti, tramite dei tralicci di acciaio zincato, ancorati alla base delle colonnine. Ogni traliccio è strallato da tre tiranti opportunamente fissati alla soletta in calcestruzzo armato e alla cerchiatura esterna sottostante le colonnine. Entrambi i trasduttori sono collegati ai tralicci tramite una piccola piastra in acciaio orizzontale, innestata di testa, su di un tubo di sezione pari a 5 cm.

L'attrezzatura installata raggiunge la massima sicurezza per le persone presenti alla base della torre e anche nella fase di montaggio ha permesso di non ricorrere a ponteggi esterni e di operare in sicurezza dall'interno della struttura.

I punti di misura sono stati orientati secondo le quattro direzioni cardinali, con la finalità di avere almeno uno o due anemometri sempre sopravento e quindi indisturbati. In questo modo è possibile rielaborare i dati dei quattro segnali pervenuti e risalire all'informazione della velocità della vena indisturbata come valore medio del segnale lentamente variabile.

I quattro trasduttori di direzione (bandierine) per il loro funzionamento necessitano di alimentazione. Tale alimentatore, connesso alla rete dedicata da 220 V, è stato posto all'interno della cuspide posta al di sopra della stanza delle Ore (95 m). Con opportuni cablaggi è stata connessa ogni coppia anemometro-bandierina tramite un unico cavo esapolare schermato. Queste connessioni elettriche corrono all'interno del tubo terminale di supporto alla strumentazione, ancorato al traliccio, e convergono tre segnali in tensione ai computer localizzati all'interno della stanza del Laboratorio. Oltre al segnale di velocità e di direzione del vento è stato necessario aggiungere il segnale di tensione di alimentazione della bandierina segnamento, per controllare eventuali derive a lungo termine, del valore della tensione a cui è proporzionale il fondo scala del segnale del trasduttore (Condoleo P., 2003).

<i>Prospetto</i>	<i>Quota</i>	<i>Localizzazione</i>	<i>Strumento</i>	<i>Numero</i>
Ovest	+84,84m	Stanza delle Ore – aggettanti dal basamento delle colonnine binate	1 esterno	Vo
Nord	+84,84m	Stanza delle Ore – aggettanti dal basamento delle colonnine binate	1 esterno	Vn
Est	+84,84m	Stanza delle Ore – aggettanti dal basamento delle colonnine binate	1 esterno	Ve
Sud	+84,84m	Stanza delle Ore – aggettanti dal basamento delle colonnine binate	1 esterno	Vs

Tabella 5 – Localizzazione di tutti gli anemometri installati



Figura 90 – Un anemometro a coppe

2.3.3.8_Servoaccelerometri

Per rilevare il comportamento dinamico della torre sono stati scelti dei servoaccelerometri. Il servoaccelerometro è un trasduttore che misura l'accelerazione della struttura e si basa sulla proprietà dei materiali piezoelettrici di generare, sulla loro superficie, delle cariche elettriche dopo aver subito una deformazione imposta da una massa a loro collegata. La struttura, muovendosi, crea uno spostamento della massa contenuta all'interno del trasduttore secondo il suo asse di sensibilità. Questo movimento viene rilevato da un trasduttore di spostamento. I trasduttori sono molto sensibili e precisi; lavorano anche alle bassissime frequenze ed hanno una notevole stabilità nel tempo. Sono quindi indispensabili per il monitoraggio di strutture che hanno frequenze proprie inferiori a 1 Hz (come il Torrazzo) e quando sono previsti lunghi periodi di acquisizione. In particolare questo strumento, con distorsione del tutto trascurabile, copre un campo di frequenza che è largamente comprensivo delle frequenze caratteristiche della struttura.

Per definire compiutamente il comportamento flessionale e tensionale della torre sono stati installati, per ogni sezione di misura, tre servoaccelerometri opportunamente disposti. In particolare sono stati disposti due trasduttori sul lato ovest. Tale disposizione è identicamente ripetuta su tutte le sezioni di misura disposte alle diverse quote: l'unica variabile è posta dai bracci (b_1 e b_2) a causa della morfologia della torre. Con opportuni algoritmi è possibile risalire alle accelerazioni definendo il comportamento rototraslatorio della sezione considerata rigida nel piano.

Per posizionare la strumentazione sono state scelte sette sezioni di misura disposte lungo lo sviluppo verticale della torre.

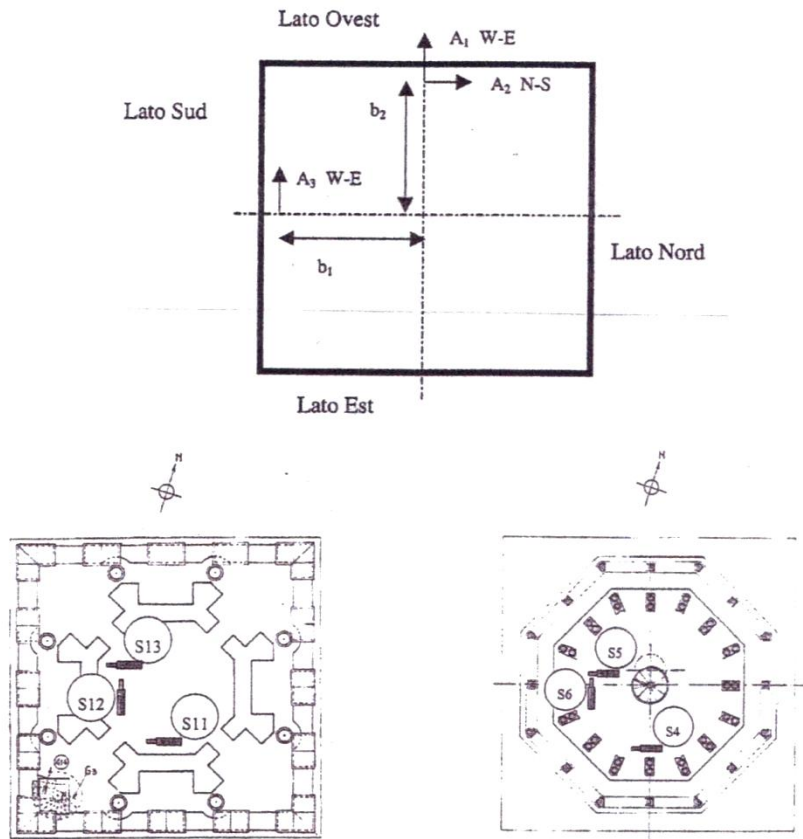


Figura 91 – Localizzazione dei servoaccelerometri

Prospetto	Quota	Localizzazione	Strumento	Numero
Ovest	+36,50m	Stanza del Laboratorio, dell'ingresso	2 interno	A36-1,2,3
Sud	+36,50m	Stanza del Laboratorio, monofora: verso ovest	1 interno	A36-1,2,3
Ovest	+50,70m	Corridoio bifore, verso l'interno	2 interno	A51-1,2,3
Sud	+50,70m	Corridoio bifore, verso l'interno	1 interno	A51-1,2,3
Ovest	+72,30m	1° livello Ghirlandina, superficie muraria interna	2 interno	A72-1,2,3
Sud	+72,30m	1° livello Ghirlandina, interno	1 interno	A72-1,2,3
Ovest	+88,30m	Stanza delle Ore, interno	2 interno	A88-1,2,3
Sud	+88,30m	Stanza delle Ore, interno	1 interno	A88-1,2,3
Ovest	+89,60m	Cuspide (interno)	2 interno	A90-1,2,3
Sud	+89,60m	Cuspide (interno)	1 interno	A90-1,2,3

Tabella 6 – Localizzazione dei servoaccelerometri installati

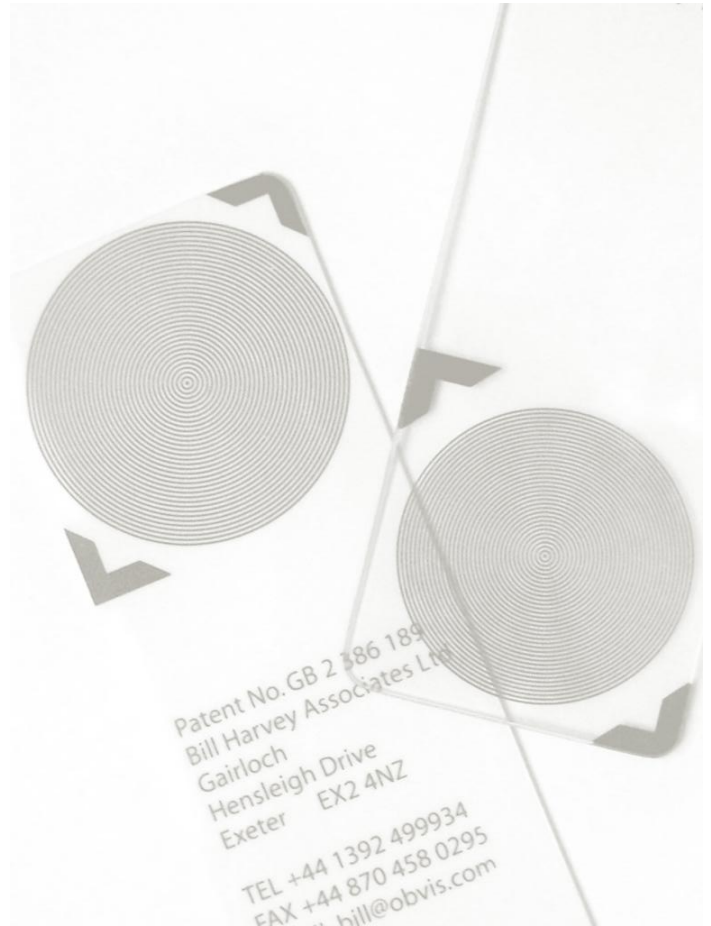
La scelta delle diverse sezioni è stata effettuata successivamente in base alla previsione delle deformate modali della torre, ottenuta mediante alla simulazione numerica a elementi finiti. Gli strumenti di acquisizione sono stati collocati, in particolare, in quelle zone in cui si presentavano i massimi spostamenti, cercando di evitare le posizioni nodali (punti di flesso delle deformate modali).

Per posizionare i servoaccelerometri sono state costruite delle piastre di acciaio di dimensioni rilevanti con lo scopo di evitare che la misura acquisita subisse gli effetti locali di un non adeguato ancoraggio del singolo mattone con la muratura circostante. La piastra è stata vincolata rigidamente alla muratura mediante dei tasselli ad espansione. Un blocchetto di acciaio, opportunamente forato e filettato sulle cinque facce, è stato saldato alla piastra. Il blocchetto consente di installare i servoaccelerometri lungo gli assi di sensibilità del trasduttore.

Il servoaccelerometro è racchiuso in un contenitore stagno in alluminio a cui è fissata la connessione elettrica amovibile (Condoleo P., 2003).



Figura 92 – Un servoaccelerometro applicato sul Torrazzo



Terzo Capitolo

I METODI DI MISURAZIONE OGGETTO DI SVILUPPO

3.1_I fessurimetri moiré

3.1.1_L'effetto moiré

In fisica l'effetto moiré è un disegno di interferenza creato, ad esempio, nel caso in cui due griglie vengono sovrapposte ed una è ruotata di un piccolo angolo, oppure quando una delle due griglie presenta un passo leggermente diverso da quello dell'altra. Le forme che si vengono a creare prendono il nome di frange di interferenza. Una delle proprietà più importanti di queste frange moiré consiste nella loro capacità di incrementare la visibilità di spostamenti anche minuscoli, sia che avvengano in una che in due direzioni.

I disegni di interferenza moiré, in alcuni campi, rappresentano uno spiacevole effetto delle immagini prodotte attraverso apparecchi digitali o tecniche particolari di grafica, che si deve cercare di eliminare (o di abbassare) in tutti i modi. Ad esempio capita quando si acquisisce con lo *scanner* un'immagine fotocopiata o in altri casi particolari.

La figura qui sotto mostra un disegno di interferenza moiré (le maglie potrebbero rappresentare delle fibre di seta ad esempio, oppure semplicemente delle linee disegnate su un foglio o su uno schermo del computer). L'intersezione non lineare delle linee crea un reale e visibile disegno di interferenza formato da bande parallele scure e chiare non ben definite.

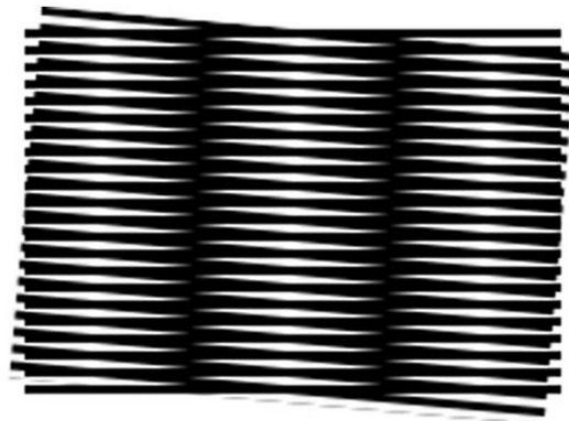


Figura 93 – Un disegno di interferenza moiré generato dall'intersezione di due griglie di linee nere parallele, dove una è leggermente ruotata rispetto all'altra

Se, invece, le linee delle griglie non fossero esattamente parallele oppure fossero curve il disegno di interferenza generato sarebbe molto più complicato. I disegni di interferenza moiré generano comunque forme complesse, o sequenze di simboli che si rigenerano con un certo periodo. Un tipico esempio di effetto moiré si ottiene quando si guardano due reti metalliche, con uguale maglia ed

uguale passo, che sono distaccate tra loro di una qualche distanza. Il particolare disegno che si viene a creare è visibile anche da una grande distanza.

I disegni di interferenza moiré sono molto noti anche in altri campi. Nella stampa di immagini di colore pieno, ad esempio, si studia in maniera specifica la migliore selezione degli angoli con cui sovrapporre i successivi schermi di toni di colore ed anche le frequenze di toni che minimizzano proprio l'effetto moiré. Nelle industrie manifatturiere, invece, questi disegni di interferenza vengono usati per studiare le venature dei materiali: deformando una griglia secondo un riferimento e misurando il disegno di interferenza, si può dedurre il suo livello di tensione. Questa tecnica è affascinante in quanto la scala del disegno di interferenza moiré è molto più grande della deformazione che lo causa, e tutto ciò rende più comode le misure.

I disegni di interferenza moiré sono comunemente visibili anche sugli schermi TV, ad esempio quando una persona ripresa indossa una maglietta oppure una giacca con un disegno o un tessuto particolare. Non appena questa persona si muove si può notare un disegno di interferenza moiré. Proprio per questo tutti i professionisti che appaiono in televisione regolarmente sanno bene che devono evitare i vestiti che causano questo genere di problema, comunemente definito *strobing* ("strobe" in inglese significa letteralmente luce stroboscopica).

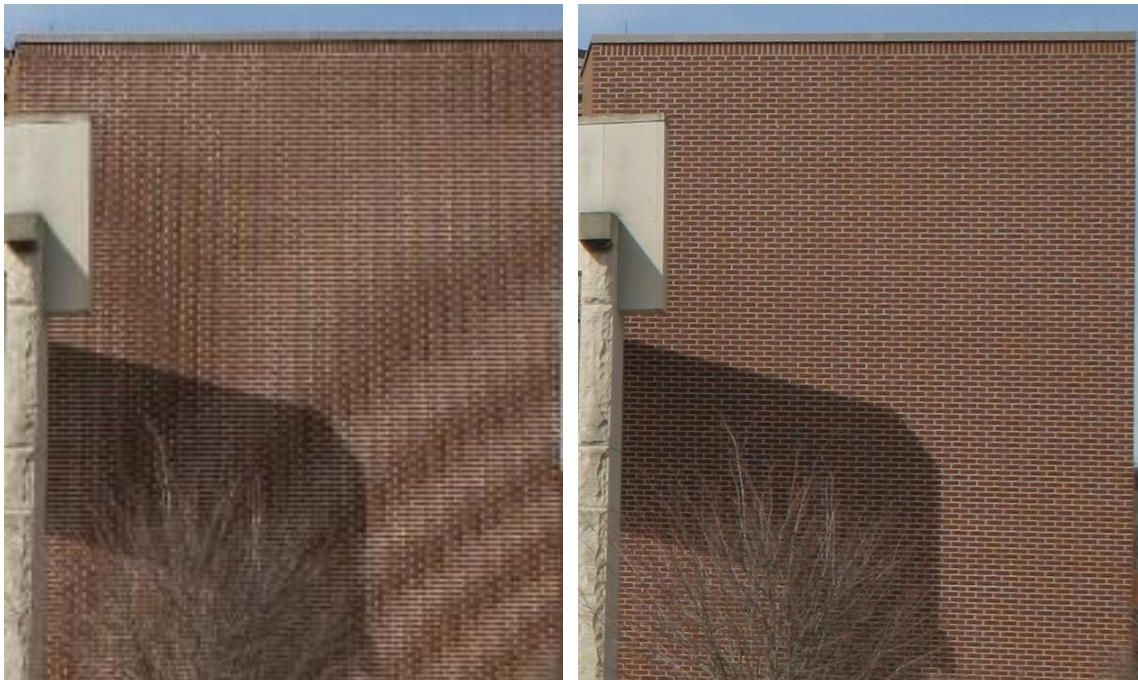


Figure 94 e 95 – A sinistra l'effetto moiré distorce molto l'immagine digitale. A destra la stessa immagine una volta corretta

3.1.2_ Il funzionamento del calibro a nonio

Prima di introdurre i fessurimetri moiré ed il loro schema di funzionamento, è utile fare un passo indietro ed analizzare un altro strumento, più datato, che presenta con essi però alcune analogie interessanti: il calibro a nonio.



Figura 96 – Un calibro a nonio

Il calibro è costituito da un'asta graduata, in genere sia in mm (3) che in pollici (4), sulla quale scorre un cursoio (2). Il cursoio e l'asta sono dotati di ganasce (7) e di becchi (9) che servono per rilevare, rispettivamente, spessori, distanze e diametri interni. All'estremità opposta il cursoio termina con una sottile asta (8) per rilevamenti di profondità. Il cursoio porta incisa una particolare graduazione o due (una adiacente alla scala in mm ed una adiacente a quella in pollici) che prende il nome di nonio.

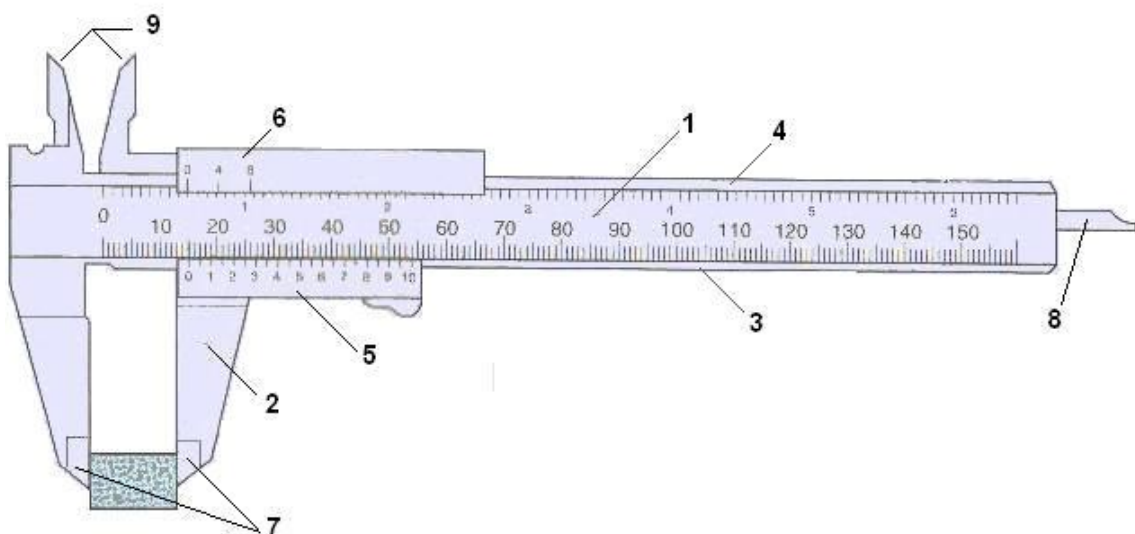


Figura 97 – Disegno schematico di un calibro a nonio con individuati i suoi componenti fondamentali

La misura viene letta sull'asta graduata in corrispondenza dello 0 del nonio, come viene spiegato in seguito. La graduazione del nonio consente di apprezzare variazioni di lunghezza più piccole del millimetro (o della frazione di pollice) rispetto a questa prima lettura. La precisione che si riesce a raggiungere dipende dal tipo di nonio.



Figura 98 – Particolare del nonio di un calibro

In generale il nonio è costituito dall'affiancamento di due scale metriche diverse, in maniera tale che ad $N-1$ divisioni dell'una corrispondano esattamente N divisioni dell'altra. Nel caso particolare del calibro il nonio ha dieci divisioni che formano una scala lunga complessivamente 9 millimetri. Sono messi così a confronto due passi leggermente differenti: l'asta graduata ha un passo di 1 mm, mentre il nonio ha un passo pari a 0.9 mm.

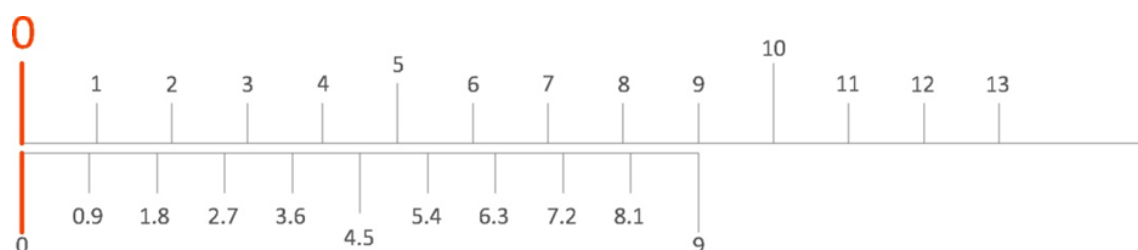


Figura 99 – Schematizzazione dei differenti passi delle tacche di un nonio (in basso) e dell'asta graduata (in alto)

Come prima cosa occorre leggere il dato della misura fino al millimetro. Per fare questo non bisogna far altro che osservare su quale (o dopo quale) tacca dell'asta graduata si trova lo zero del nonio. Effettuata questa lettura bisogna considerare le tacche dell'asta e del nonio contemporaneamente. Si deve ricercare quali sono le due che sembrano più in continuità l'una con l'altra ed a quel punto, per ottenere il primo decimale di millimetro, basta contare a quale tacca del

nonio si sta facendo riferimento. Le tacche che possono corrispondere sono, come è ovvio, solamente due (una coppia).

Una spiegazione abbastanza intuitiva è la seguente. La suddivisione del nonio è di 0.1 mm più corta di quella dell'asta. Proprio la differenza di passo permette di affermare che, partendo da una situazione in cui i due zeri sono sovrapposti (fig. 99), per ritrovare invece le due tacche "1" sovrapposte si dovrà attendere uno spostamento pari ad esattamente 0.1 mm (per quanto riguarda il tipo di calibro a nonio che è stato analizzato). Si avrà uno spostamento di 0.2 mm quando le due tacche "2" saranno sovrapposte e così via. Aggiungendo un decimo di millimetro allo spostamento pari a 0.9 mm (con le due tacche "9" sovrapposte) si potrà osservare una nuova situazione: la sovrapposizione sarà tra lo zero del nonio e la tacca "1" dell'asta graduata. Il ragionamento può procedere anche all'infinito con il seguente schema: la misura fino al millimetro viene letta grazie alla posizione dello zero del nonio, mentre per ottenere il decimo di millimetro bisogna osservare quale tacca del nonio si sovrappone meglio ad una dell'asta.

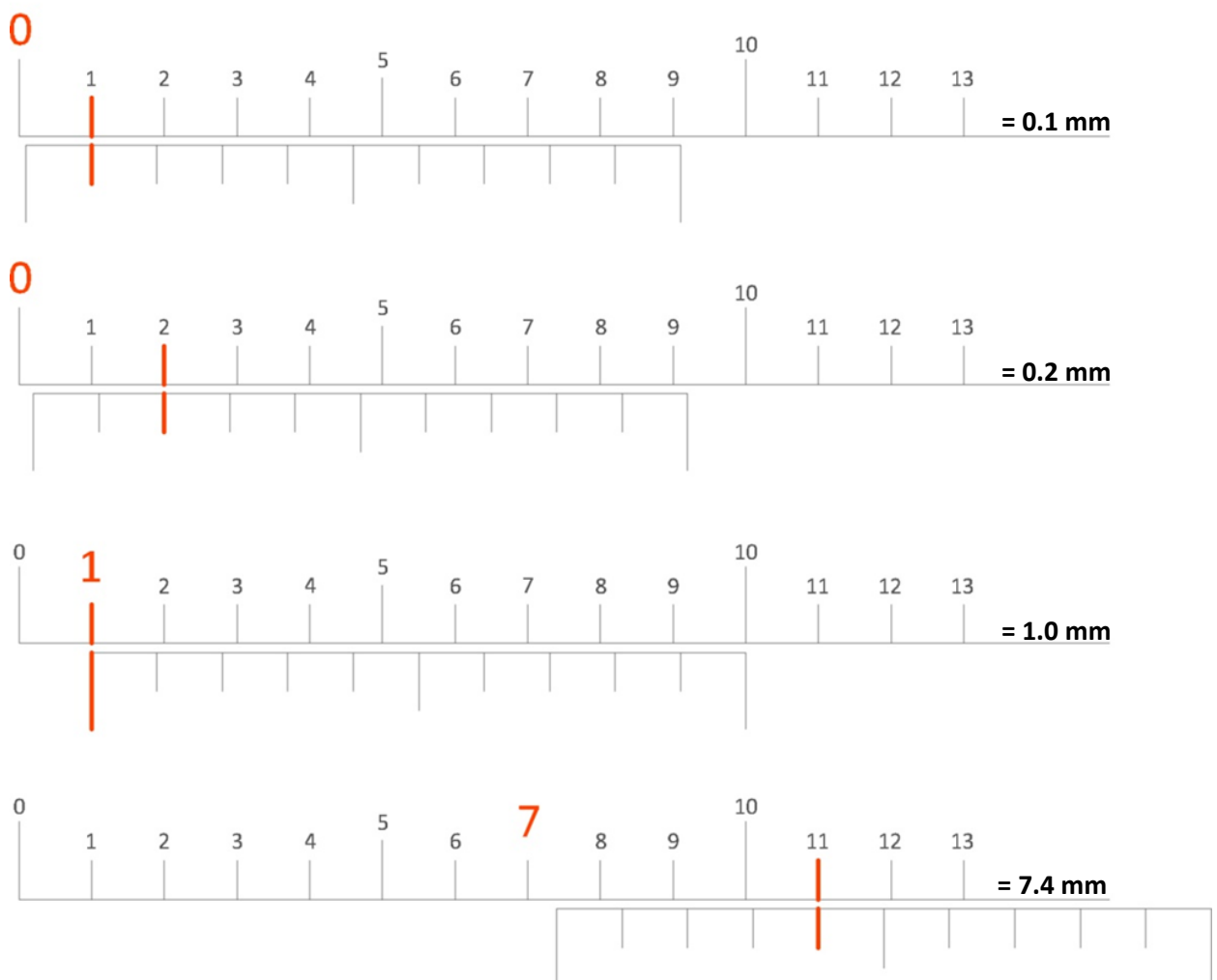


Figura 100 – Schematizzazione della lettura di alcune misure tipo attraverso il calibro a nonio. In ordine vengono rappresentati le seguenti misure: 0,1 mm; 0,2 mm; 1 mm; 7,4 mm

Ovviamente basta osservare un fessurimetro moiré per rendersi conto che i due strumenti sono molto diversi sia per funzione che per forma e dimensioni. Ad ogni modo alcune analogie riguardo alla concezione che sta alla base del funzionamento si possono ritrovare. Si potrebbe addirittura affermare che il fessurimetro moiré sia una specie di nonio bidimensionale, in quanto sfrutta due retini a passo differente, ma formati da cerchi concentrici. Questa caratteristica fornisce al fessurimetro la capacità di analizzare misure e spostamenti su due dimensioni, aspetto che è indispensabile nel monitoraggio delle fessure, che il più delle volte sono interessate da fenomeni di apertura/chiusura e contemporaneamente da degli scorrimenti paralleli.

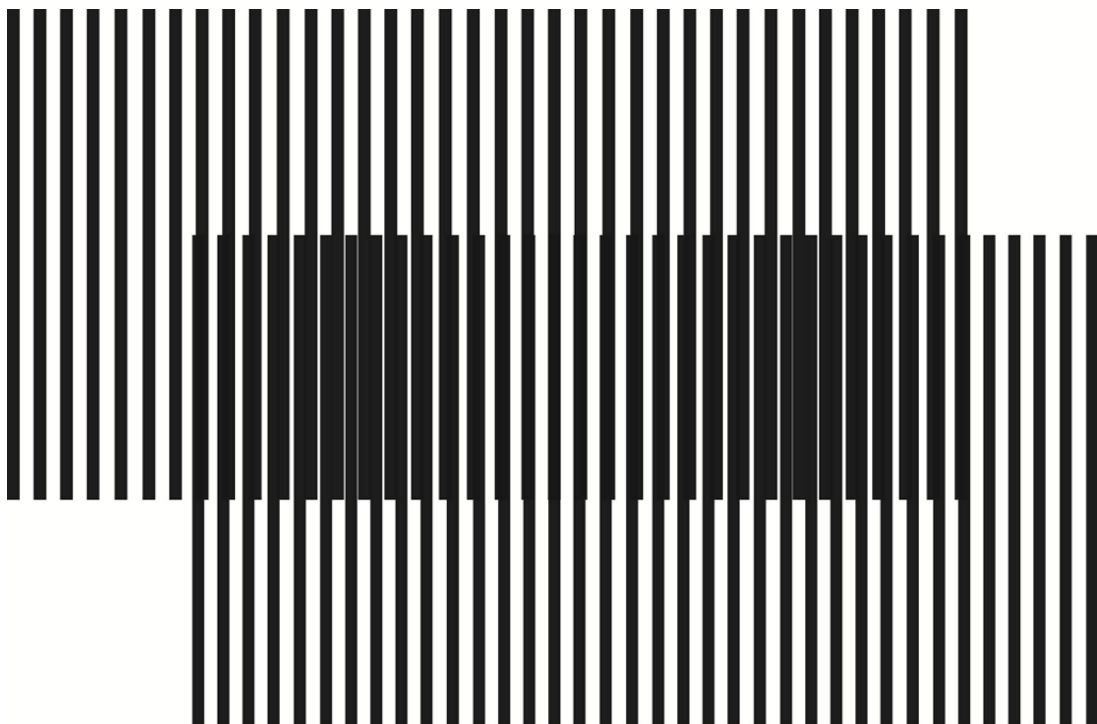


Figura 101 – Sovrapposizione di due retini di righe nere e bianche a passo leggermente diverso. Si può notare come si formino dei disegni di interferenza. Il confronto tra due retini divisi in maniera leggermente diversa sta alla base del funzionamento sia del calibro a nonio che del fessurimetro moiré. Per piccoli spostamenti di un retino le frange di interferenza subiscono degli spostamenti più evidenti

L'immagine proposta nella prossima pagina (fig. 102) serve da suggestione per ritrovare le analogie logiche dietro il funzionamento di nonio e fessurimetro moiré. La costruzione di tale immagine è avvenuta proprio prendendo i due passi differenti di asta graduata e nonio. Ogni intervallo è stato considerato alternativamente come un pieno (in nero) o un vuoto (in bianco). Successivamente questi pieni e vuoti sono stati fatti ruotare attorno ad un centro comune. Il nero dei cerchi si somma indifferentemente sia che appartenga al passo dell'asta graduata che a quello del nonio. Nelle prossime pagine sarà semplice ritrovare figure simili ottenute attraverso i retini del fessurimetro.

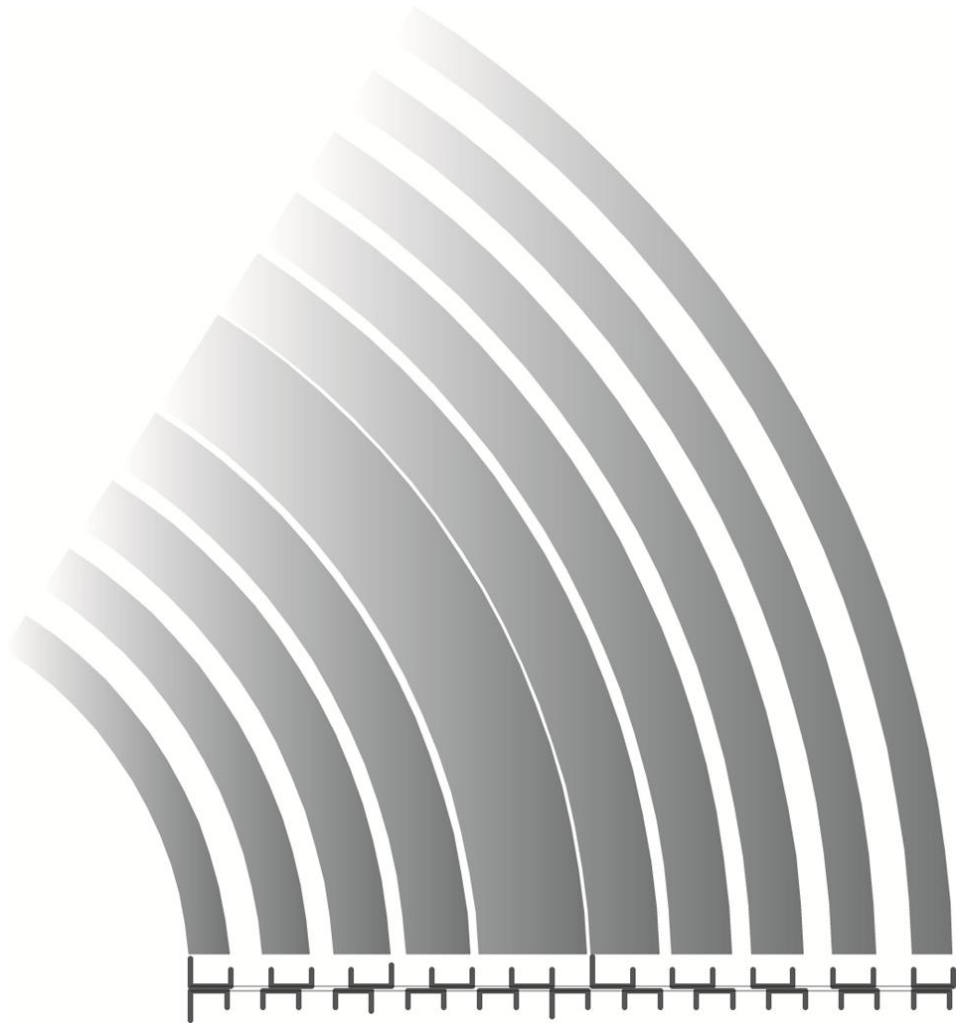


Figura 102 – Rotazione dei due passi di nonio e asta graduata pensati come se si alternassero una serie di neri e bianchi. L'immagine che ne risulta è molto simile al disegno di interferenza generato dai due retini del fessurimetro moiré

3.1.3_Moiré TellTales

I *Moiré TellTales* sono strumenti che vanno utilizzati nel monitoraggio statico delle fessure. La loro nascita è il risultato di un lungo percorso sul tema del monitoraggio iniziato tempo addietro con le spie di malta inserite nello spessore della fessura e con una data segnata a lato e proseguita, poco dopo, con le spie di vetro apposte al di sopra della fessura. Questi metodi di monitoraggio presentano dei limiti di precisione piuttosto evidenti perché sono capaci di rendere noto solo, attraverso la loro eventuale rottura, se un qualche movimento è accaduto nel lasso di tempo intercorso dal posizionamento iniziale. Quegli strumenti non sono in grado di fornire dei dati metrici circa lo spostamento avvenuto. Un tecnico esperto riusciva a fare delle considerazioni sulla progressione del moto (assente, costante, accelerato o ritardato) basandosi sul tempo che intercorreva tra una rottura e la successiva delle spie, ma si è palesata comunque nel tempo la necessità di avere a disposizione degli strumenti più precisi e rigorosi.

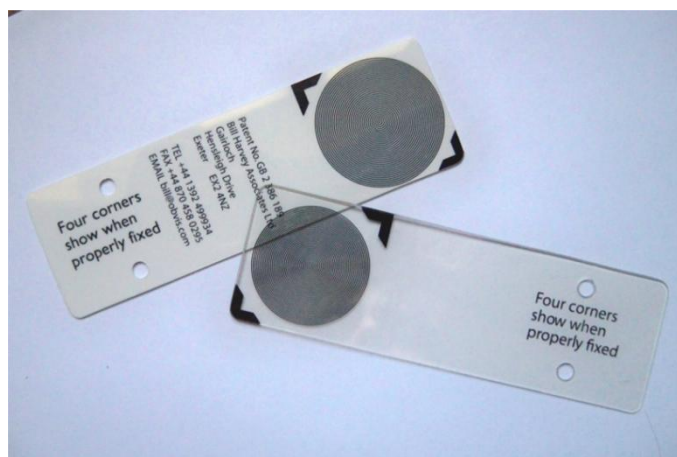


Figura 103 – Un fessurimetro moiré

Sin dagli anni settanta del secolo scorso sono stati disponibili degli strumenti formati da due componenti plastici che consentivano di indicare degli spostamenti di una fessura con un'accuratezza di circa 1 mm (i vari fessurimetri). I *Moiré TellTales* sono la forma più innovativa di questa famiglia di strumenti composti da due elementi. Essi presentano tre vantaggi sostanziali:

- Hanno una sensibilità molto alta;
- Si possono eseguire le lettura anche da distanze considerevoli;
- Possono essere filmati per mostrare un movimento dinamico.

Le due parti di questo strumento hanno ognuna un retino di cerchi concentrici, di passo leggermente diverso, stampati in maniera estremamente accurata. Questa qualità è molto importante dal momento che, facendo delle prove con delle stampe con una risoluzione inferiore, ci si rende conto di come si modifichino in questo modo anche i disegni di interferenza generati. Bisogna prestare molta attenzione nel momento del fissaggio dello strumento al verso del componente superiore. Essendo trasparente potrebbe sembrare indifferente il suo verso ed invece non lo è affatto. Il retino di cerchi concentrici, infatti, è stampato su una delle sue facce ed è molto importante fare in modo che sia proprio la faccia con il retino quella ad andare a contatto diretto con il retino inferiore, stampato su sfondo bianco (e per questo difficile da invertire!). In questo modo le distorsioni sono ridotte al minimo ed il disegno di interferenza può giustamente essere ritenuto affidabile. Per facilitare il corretto posizionamento sono stampate su ognuno dei due componenti delle “L” su due dei suoi quattro angoli. Lo strumento è in posizione corretta quando si vedono tutte e quattro (altrimenti si sovrapporrebbero a due a due).

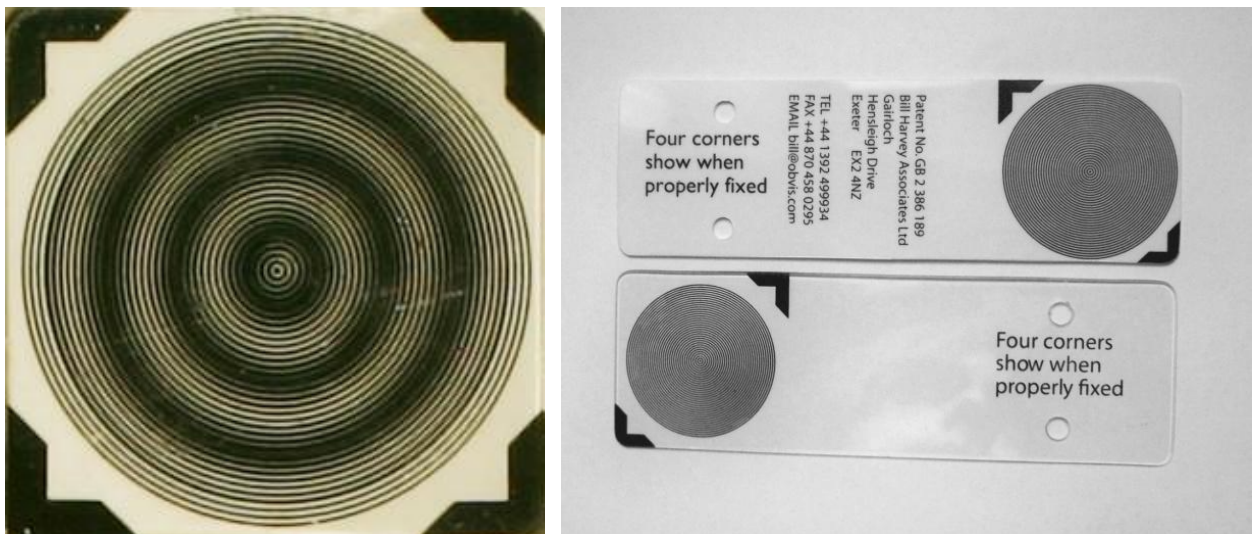


Figure 104 e 105 – Ingrandimento dei retini. Ai quattro angoli si possono vedere le “L” che servono per il corretto posizionamento dello strumento. A destra i due componenti affiancati

Quando è posizionato sullo zero lo strumento mostra tre cerchi concentrici più scuri leggermente indefiniti (frange di interferenza). Questi cerchi sono sempre facilmente individuabili. I piccoli movimenti delle fessure causano cambiamenti più accentuati nel disegno di interferenza generato dai retini di cerchi concentrici.

E' necessario in questa sede presentare i retini dei fessurimetri moiré in tutte le loro caratteristiche. Innanzitutto essi non hanno lo stesso diametro, perché quello inferiore, disegnato su sfondo bianco, è più grande. Rispettivamente il retino inferiore (1) ha un diametro di 37,6 mm, mentre il retino superiore (2) ha un diametro di 34,1 mm. Entrambi presentano lo stesso numero di cerchi neri (35) e per questo, in virtù delle differenti dimensioni del diametro, anche il passo dei cerchi sarà diverso. Con il termine passo si intende la distanza che intercorre tra i punti omologhi di due cerchi successivi. In altre parole è la somma tra lo spessore di un cerchio nero e di uno bianco (o trasparente). D'ora in avanti si definirà con P_1 il passo del retino inferiore e con P_2 il passo del retino superiore (con $P_1 > P_2$). E' importante considerare il passo dei retini e non lo spessore dei singoli cerchi neri e bianchi perché, in linea teorica, sarebbe possibile proporre retini con uno spessore dei cerchi sbilanciato a favore di uno dei due colori, ma che mantengono conservato il medesimo passo.

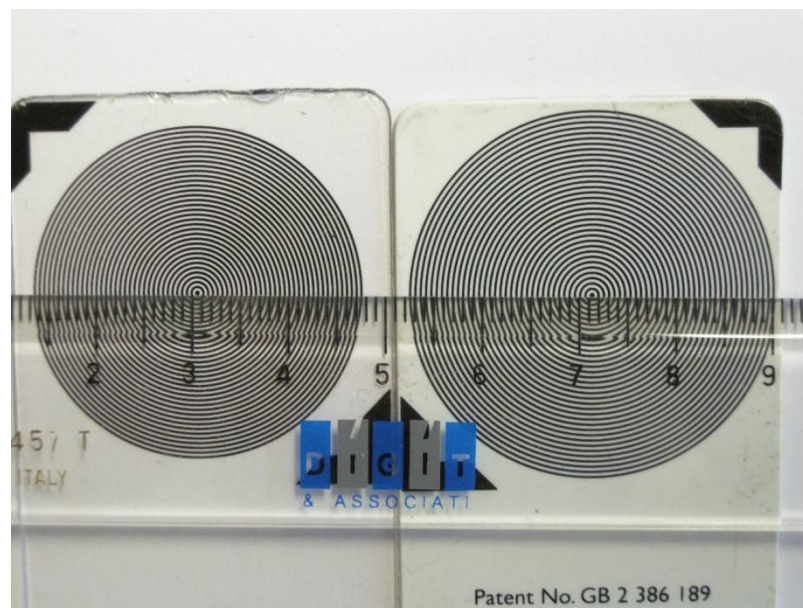


Figura 106 – I due retini di un fessurimetro moiré messi a confronto

Esiste una variazione della distanza radiale R , in corrispondenza della quale si possono contare $N-1$ passi del retino 1, che corrispondono a N passi del retino 2. Le relazioni tra queste grandezze possono essere così riassunte:

$$P_1 (N-1) = P_2 N \quad (1)$$

In questo modo si ottiene:

$$N = \frac{P_1}{P_1 - P_2} = \frac{1}{1 - \frac{P_2}{P_1}} \quad (2)$$

$$R = \frac{P_1 P_2}{P_1 - P_2} \quad (3)$$

In realtà non è strettamente necessario che N sia un numero intero, poiché l'interferenza tra i due retini avviene ugualmente, anche se con qualche sfasamento tra le righe. E' inoltre interessante considerare quale sia l'estensione dei retini rispetto alla distanza R , perché, come si vedrà, alcune delle approssimazioni delle formule analitiche (v. 3.1.4) dipendono dal confronto tra lo spostamento misurato e la distanza radiale alla quale viene osservata la trasmittanza dei retini.

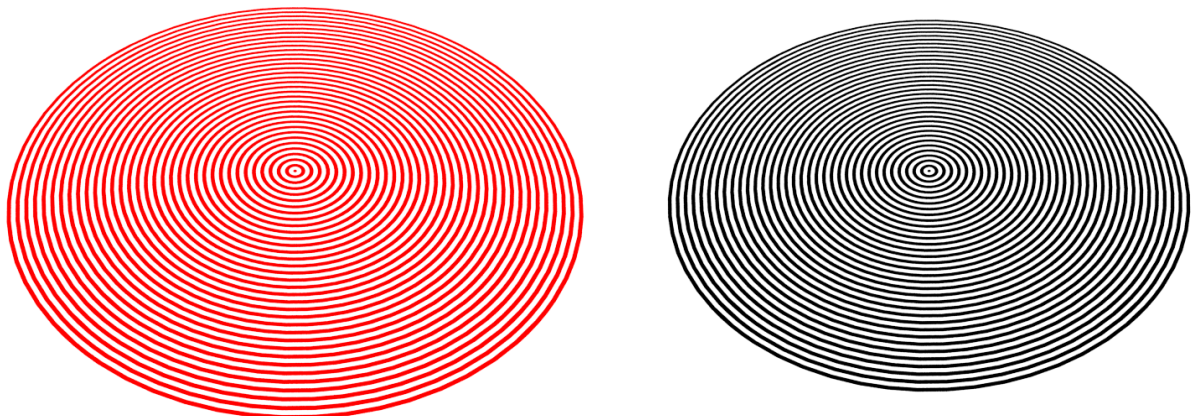


Figura 107 – I due retini di cerchi concentrici. A sinistra (in rosso) il retino 1, a destra (in nero) il retino 2

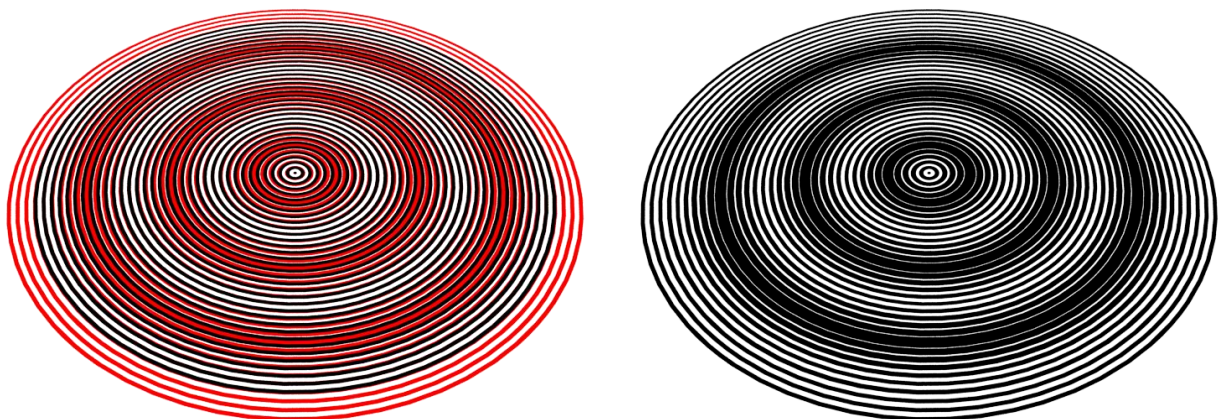


Figura 108 – I due retini sovrapposti. A sinistra ancora con differenti colori (il retino inferiore in rosso) per sottolineare l'apporto di ognuno dei due al disegno finale delle frange di interferenza. A destra invece si possono vedere i due retini in nero come nello strumento reale

Attualmente, per riuscire ad esprimere con una quantità fisica lo spostamento rappresentato dal disegno delle frange moiré dello strumento, è possibile solamente operare un confronto tra quello e le figure formate da un programma sul *web*, che riproduce i disegni delle frange a partire da uno spostamento noto (www.obvis.com/ArchieFiles/MoireTest.html). Grazie ad esso è possibile muovere un retino sopra all'altro tramite due barre di controllo che rappresentano le due componenti dello spostamento (x e y) per ricreare sullo schermo un disegno delle frange tanto più simile a quello reale dello strumento fisico. Questo programma ha una risoluzione del decimo di millimetro. Logicamente questo tipo di analisi indiretta delle frange fornisce un dato approssimato.

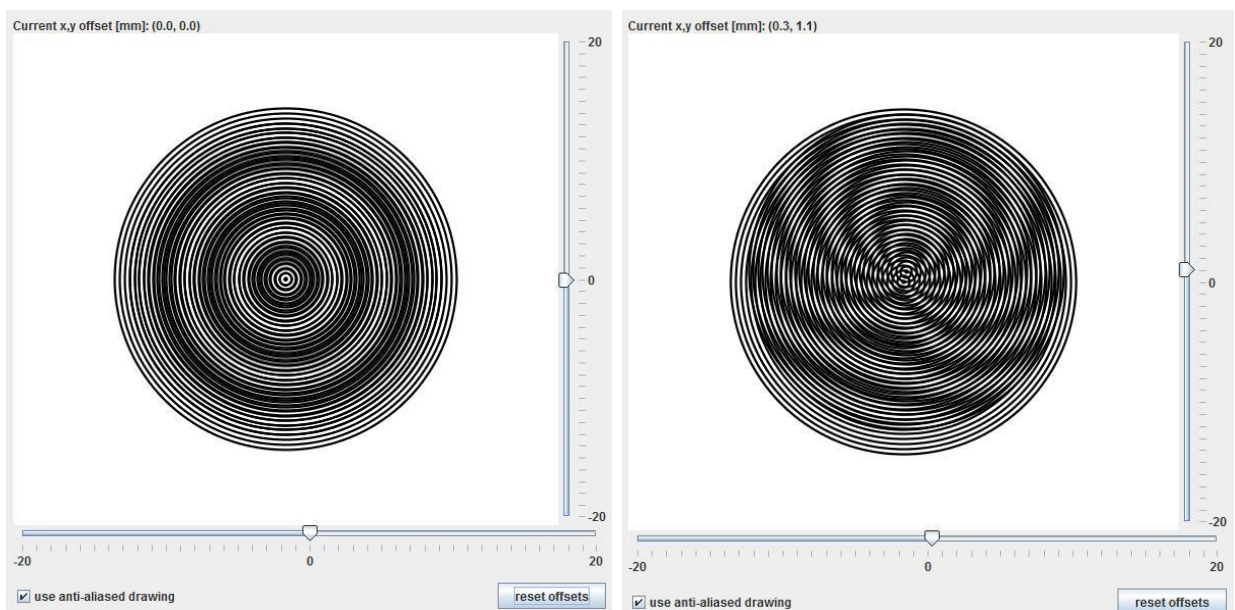


Figure 109 e 110 – Due stralci del programma disponibile sul *web*. Nella figura a destra possiamo notare il disegno delle frange per uno spostamento di + 0.3 mm sull'asse x e di + 1.1 mm sull'asse y (www.obvis.com/ArchieFiles/MoireTest.html)

Questo programma rappresenta in maniera corretta i disegni delle frange che si vengono a creare, ma ha il limite di non basarsi su un legame diretto tra l'andamento delle frange e lo spostamento tra i retini. L'utilizzo di un approccio diretto dovrebbe consentire, in linea di principio, una maggiore accuratezza soprattutto nel caso di piccoli spostamenti. Questa differenza viene accuratamente spiegata nel prossimo paragrafo che si occupa in maniera specifica dell'analisi delle frange moiré in retini di cerchi concentrici.

3.1.4_L'analisi delle frange moiré in retini di cerchi concentrici

A questo punto occorre spiegare come è stato risolto il problema più complesso che affronta questo lavoro di tesi: lo sviluppo di una dimostrazione matematica che analizzi il disegno delle frange moiré in retini di cerchi concentrici per ricavarne un dato fisico dello spostamento relativo intercorso tra i due lembi di una fessura. In questa maniera si possono porre le basi per riuscire a far compiere a questo recente metodo di analisi un sostanziale passo in avanti che lo possa promuovere ad effettivo strumento pratico per il monitoraggio statico delle fessure. In tutto il paragrafo si fa riferimento ai retini di cerchi concentrici del fessurimetro moiré che sono stati presentati nel paragrafo precedente.

Si propone in questa sede un procedimento diretto di analisi, che ha come obiettivo definire accuratamente gli spostamenti a partire da ogni particolare disegno che le frange possono formare. Un altro tipo di approccio è, invece, rappresentato dai metodi che propongono il riconoscimento dello spostamento particolare attraverso il confronto dell'immagine specifica con una serie di immagini campione di spostamenti noti organizzate in una banca dati. Questo secondo approccio viene definito indiretto (*K. S. Yen e M. M. Ratman, 2010*). L'utilizzo di un approccio diretto dovrebbe invece consentire una migliore accuratezza, soprattutto nel caso di piccoli spostamenti, che comportano una modesta deformazione delle frange.

In un articolo è stata trovata un'analisi diretta, rigorosa e molto accurata, che presenta molte analogie con quella che si sta per proporre qui di seguito (*Y. C. Park e S.W. Kim, 1994*). Quell'analisi si occupa però dell'allineamento nella fabbricazione dei circuiti integrati stampati su strati, ovvero di oggetti molto più piccoli dei nostri (si parla di frazioni di micron). Oltre a questo aspetto verranno prese in considerazione anche altre difformità nel corso della spiegazione dell'analisi.

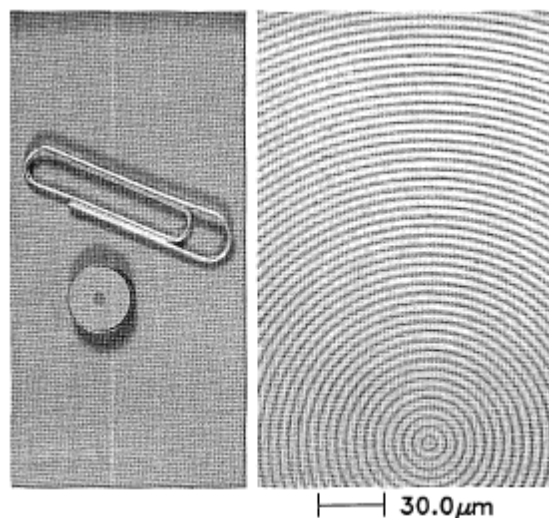


Figure 111 e 112 – Stralci dall'articolo *Y. C. Park e S. W. Kim* che danno idea delle dimensioni dei loro retini

In primo luogo bisogna fornire un'espressione matematica che sia in grado di dare forma all'andamento dei due retini, in particolare a ciò che viene definito trasmittanza (S). Essa viene assunta come sinusoidale di ampiezza unitaria, limitandosi alla prima armonica dell'andamento reale, che invece è ben descritto da un'onda quadra.

$$S_1(\rho_1, \theta) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi(N-1) \cdot \rho_1)] \quad (1)$$

$$S_2(\rho_2, \theta) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi N \cdot \rho_2)] \quad (2)$$

In queste espressioni:

- R è la distanza radiale alla quale i retini si ritrovano con la stessa fase (periodo delle frange);
- $N-1$ è il numero delle righe del retino 1 in un raggio R , [passo $P1= R/(N-1)$];
- N è il numero di righe del retino 2 in un raggio R , [passo $P2= R/N$];
- ρ è la distanza radiale in forma adimensionale misurata dai rispettivi centri [$\rho = r/R$].

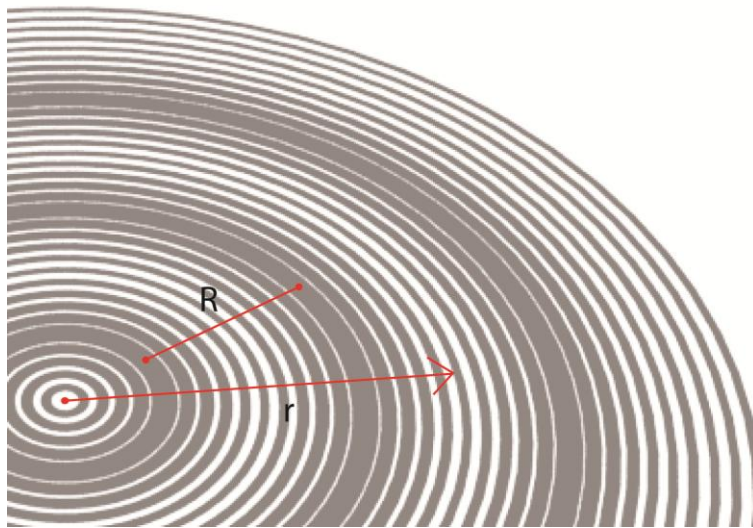


Figura 113 – Rappresentazione delle lunghezze r e R

Diversamente dal procedimento proposto da *Park* e *Kim*, che prendono come riferimento il punto centrale del retino 1, in questo caso gli sviluppi vengono svolti con riferimento al punto O intermedio tra i centri dei due retini (fig. nella prossima pagina). Questa differenza si giustifica nel fatto che l'applicazione suggerita dagli autori è quella di permettere il centraggio di un oggetto rispetto ad un punto fisso, mentre in questo caso viene ricercato lo spostamento relativo tra i due lembi di una fessura, senza poter individuare un punto fisso di riferimento.

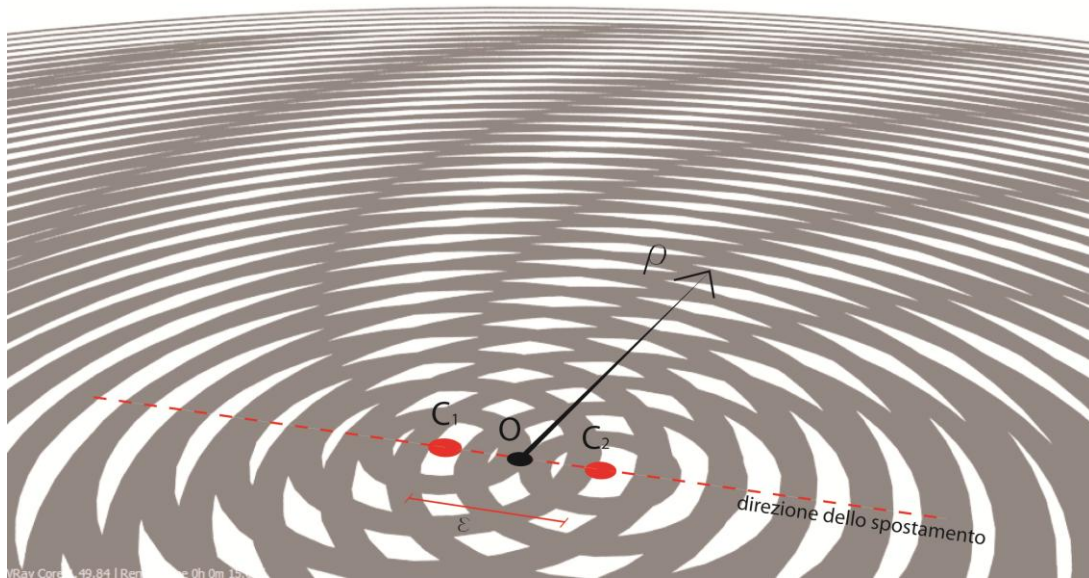


Figura 114 – Rappresentazione del punto O, intermedio tra i centri dei due retini

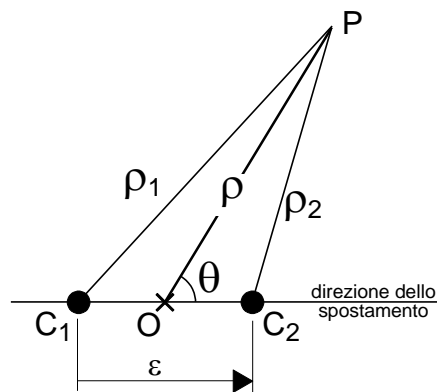


Figura 115 – Rappresentazione del punto O, intermedio tra i centri dei due retini, e delle distanze adimensionali ρ , ρ_1 e ρ_2

Per ottenere i valori ρ_1 e ρ_2 viene utilizzato il teorema del coseno, che correla la lunghezza dei lati di un triangolo al coseno di uno dei suoi angoli, e permette di scrivere:

$$\rho_1 = \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 + \varepsilon \rho \cdot \cos(\theta)} \quad (3)$$

$$\rho_2 = \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 - \varepsilon \rho \cdot \cos(\theta)} \quad (4)$$

Nelle due espressioni precedenti:

- e è lo spostamento relativo tra i due retini;
- ε è lo spostamento relativo in forma adimensionale [$\varepsilon = e/R$].

Si esplicitano qui di seguito alcuni dei passaggi significativi per la soluzione delle due radici delle espressioni precedenti, utilizzando, tra gli altri, la serie di *Taylor*. I due procedimenti per ottenere ρ_1 e ρ_2 sono analoghi, perché si differenziano semplicemente per il segno dell'ultimo termine sotto radice.

$$\rho_1, \rho_2 = \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2} \pm \varepsilon \cdot \cos(\theta) =$$

$$= \rho \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{2\rho}\right)^2} \pm \frac{\varepsilon}{\rho} \cdot \cos(\theta) \cong$$

$$\cong \rho \sqrt{1 \pm \frac{\varepsilon}{\rho} \cdot \cos(\theta)} \cong$$

$$\cong \rho \left[1 \pm \frac{\varepsilon}{2\rho} \cdot \cos(\theta)\right]$$

$$\rho_1 \cong \rho + \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

$$\rho_2 \cong \rho - \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cos(\theta) \quad (6)$$

A questo punto si può esprimere la distribuzione dell'intensità luminosa trasmessa:

$$I(\rho, \theta) = S_1(\rho_1, \theta) \cdot S_2(\rho_2, \theta) = \quad (7)$$

$$I(\rho, \theta) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi(N-1) \cdot \rho_1)] \cdot \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi N \cdot \rho_2)] =$$

$$I(\rho, \theta) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi(N-1) \cdot \left(\rho + \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cos(\theta) \right) \right) \right] \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi N \cdot \left(\rho - \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cos(\theta) \right) \right) \right] =$$

$$I(\rho, \theta) = \frac{1}{4} \cdot \left[1 + \cos\left(2\pi(N-1)\left(\rho + \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) + \cos\left(2\pi N\left(\rho - \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) + \right. \\ \left. + \cos\left(2\pi(N-1)\left(\rho + \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) \cdot \cos\left(2\pi N\left(\rho - \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) \right] \quad (8)$$

Si utilizza la terza formula di prostaferesi per trasformare una somma di funzioni trigonometriche di due angoli in un prodotto di funzioni trigonometriche, ovvero:

$$\frac{\cos(\alpha) + \cos(\beta)}{2} = \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \quad (9)$$

Dopo aver posto nell'ultimo termine tra parentesi:

$$\frac{\alpha + \beta}{2} = 2\pi N\left(\rho - \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right) \quad (10)$$

$$\frac{\alpha - \beta}{2} = 2\pi(N-1)\left(\rho + \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right) \quad (11)$$

si ottiene:

$$\alpha = 2\pi\left[(2N-1)\rho - \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right] \quad (12)$$

$$\beta = 2\pi\left[\rho - (2N-1)\frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right] \quad (13)$$

e quindi:

$$I(\rho, \theta) = \frac{1}{4} \cdot \left[1 + \cos\left(2\pi(N-1)\left(\rho + \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) + \cos\left(2\pi N\left(\rho - \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}\cos\left(2\pi\left((2N-1)\rho - \frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) + \frac{1}{2}\cos\left(2\pi\left(\rho - (2N-1)\frac{\varepsilon}{2}\cos(\theta)\right)\right) \right] \quad (14)$$

L'ultima relazione (14) contiene gli stessi cinque termini dell'equazione 7 riportata nell'articolo, che mantengono anche lo stesso significato fisico già discusso nello stesso. Tuttavia, la formulazione degli ultimi due termini è la stessa per quanto riguarda la dipendenza da ρ , mentre è diversa per quanto riguarda la dipendenza da ε , come effetto della diversa scelta del punto di riferimento per la misura delle distanze radiali (O invece di C_1).

Di questa distribuzione di intensità si vuole determinare l'andamento lungo i raggi, e quindi al variare di ρ , mantenendo θ costante. Si può notare che i primi quattro termini hanno un andamento periodico, con un periodo che è una frazione intera del periodo R delle frange. Questo contributo può essere filtrato considerando solo la componente di periodo R dell'intensità $I(\rho, \theta)$.

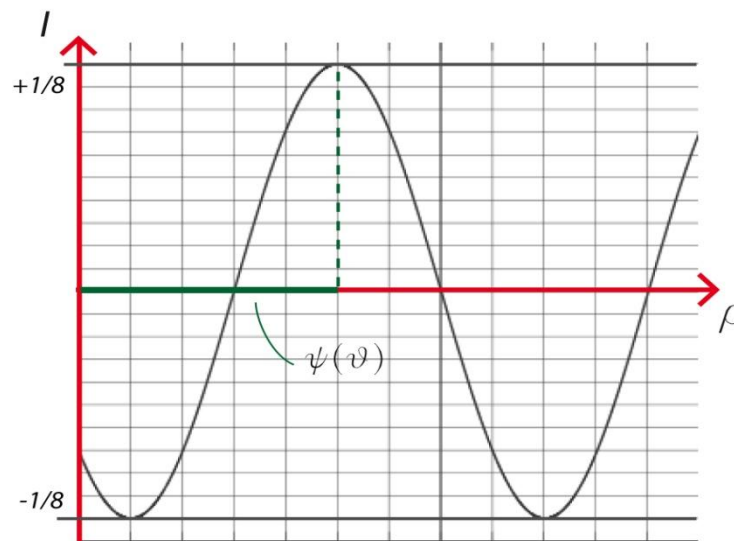


Figura 116 – Grafico della variazione della distribuzione di intensità dei due retini al crescere di ρ (θ costante)

L'ultimo termine ha anch'esso un andamento periodico lungo i raggi uscenti dall'origine del sistema di riferimento, con un periodo R (variazione unitaria di ρ), come risulta evidente decomponendo il coseno di una differenza di angoli:

$$\begin{aligned}
 &\cos(2\pi(\rho - (N - 1/2) \cdot \varepsilon \cdot \cos(\theta))) = \\
 &= \cos(2\pi\rho) \cdot \cos((N - 1/2) \varepsilon \cos(\theta)) + \sin(2\pi\rho) \cdot \sin((N - 1/2) \varepsilon \cos(\theta)) = \qquad (15) \\
 &= \cos(2\pi\rho - \psi(\theta))
 \end{aligned}$$

dove la fase $\psi(\theta)$ dell'intensità luminosa per il generico raggio uscente dal centro delle frange di interferenza con angolo θ è data da:

$$\psi(\theta) = 2\pi(N - 1/2) \varepsilon \cdot \cos(\theta) \quad (16)$$

Dal punto di vista operativo, la fase $\psi(\theta)$ può essere estratta integrando lungo i raggi il prodotto dell'intensità luminosa $I(\rho, \theta)$ per le funzioni $\sin(2\pi\rho)$ e $\cos(2\pi\rho)$ per una variazione intera di ρ . Questo permette di filtrare le componenti di frequenza più elevata e di eliminare l'influenza delle possibili variazioni di luminosità legate alla cattiva qualità dell'immagine.

In particolare si può scrivere:

$$\psi_{\text{exp}}(\theta) = a \tan \left(\frac{\int_{\rho_0}^{\rho_0+n\pi} I(\rho, \theta) \cdot \sin(2\pi\rho) d\rho}{\int_{\rho_0}^{\rho_0+n\pi} I(\rho, \theta) \cdot \cos(2\pi\rho) d\rho} \right) \quad (17)$$

Si può notare che al variare dell'angolo azimutale θ la fase ha un andamento sinusoidale, con valore massimo nella direzione $\theta = 0$ dello spostamento del retino 2 (più fitto) rispetto al retino 1 (più rado) e valore minimo in direzione opposta $\theta = \pi$.

L'ampiezza di oscillazione della fase tra i due valori estremi è direttamente proporzionale allo spostamento $e = \varepsilon \cdot R$. Per spostamenti sufficientemente grandi questa può superare l'intervallo $-\pi$, $+\pi$ e quindi il risultato della funzione arcotangente andrà corretto di un multiplo di 2π (unwrapping).

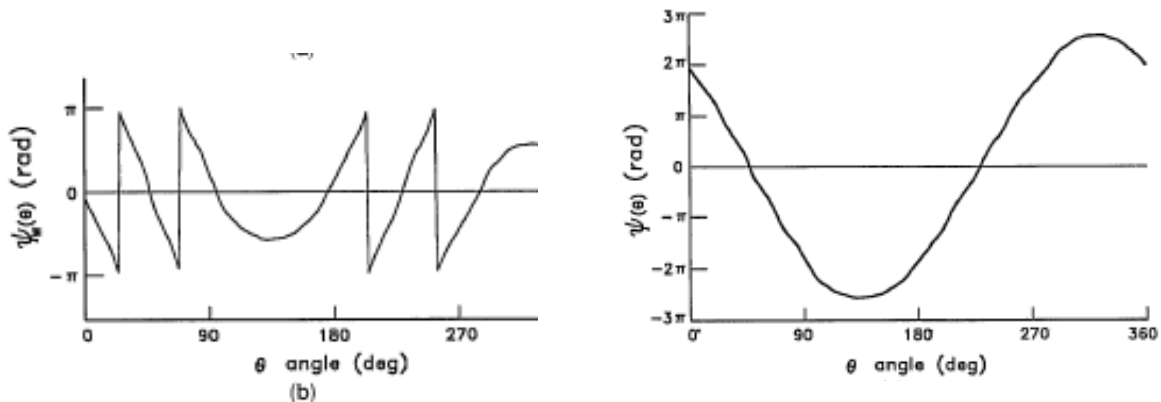


Figure 117 e 118 – Grafici della variazione di fase ψ al crescere dell'angolo azimutale θ in casi di spostamento grandi. A sinistra si vede un grafico che presenta dei salti di 2π a causa dei limiti della funzione arcotangente. A destra si vede invece la sinusoide continua con la corretta ampiezza di oscillazione ("unwrap"= letteralmente "spacchettare")

Eventualmente anche l'ampiezza di oscillazione della funzione $\psi_{exp}(\theta)$ può essere determinata a partire dall'integrale del suo prodotto con le funzioni $\sin(2\pi\rho)$ e $\cos(2\pi\rho)$. Nel caso generale in cui la direzione di spostamento non sia nota a priori (come ipotizzato in questa trattazione imponendo lo spostamento in direzione $\theta = 0$) gli integrali permettono anche di determinare la sua direzione φ :

$$a = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \psi_{exp}^{unw}(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta \quad (18)$$

$$b = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \psi_{exp}^{unw}(\theta) \cdot \cos(\theta) d\theta \quad (19)$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2\pi(N - 1/2)} \cdot R \quad (20)$$

$$\varphi = a \tan\left(\frac{a}{b}\right) \quad (21)$$

La relazione trovata per la fase $\psi(\theta)$ è del tutto simile all'equazione 12 dell'articolo, se si fa eccezione per il termine $1/2$ tra parentesi. Il contributo di questo termine è abbastanza modesto nel caso di retini aventi passo simile, anche se rappresenta comunque un miglioramento dell'accuratezza nella stima dello spostamento (nell'articolo $N=100$, con errori dell'1‰ e dello 0.5% per le due formule nell'intervallo $\varepsilon = 0 \div 0.2$).

Tuttavia, nell'applicazione ai retini per la misura dell'apertura di fessura la differenza di passo è più marcata e la nuova relazione porta a risultati molto migliori (errore ancora dell'1‰ invece che del 4.6%).

Le equazioni fin qui introdotte risentono dell'approssimazione introdotta nella formulazione delle distanze radiali ρ_1 e ρ_2 (equazioni 3 e 4), dove i termini in ε^2 sono stati trascurati e la radice quadrata è stata linearizzata mediante lo sviluppo in serie al primo termine. Il peso di questa approssimazioni diventa più importante quando la distanza radiale ρ diventa confrontabile con lo spostamento adimensionale ε e quando quest'ultimo tende all'unità.

L'influenza del primo parametro può essere ridotta scegliendo un valore sufficientemente elevato per l'inizio ρ_0 dell'intervallo di integrazione lungo i raggi nel calcolo di $\psi_{exp}(\theta)$.

L'accuratezza della formulazione approssimata è stata verificata determinando l'errore commesso calcolando lo spostamento tra i retini con l'equazione (20) a partire dagli integrali dell'equazione (17) eseguiti numericamente sull'intensità luminosa definita dall'equazione (7) in funzione delle effettive distanze radiali ρ_1 e ρ_2 .

L'errore commesso è stato calcolato nello specifico caso che vede $N = 11$ e $R = 5.5$ mm, valori che corrispondono alla geometria dei fessurimetri utilizzati nelle prove sperimentali (*Moiré TellTales*).

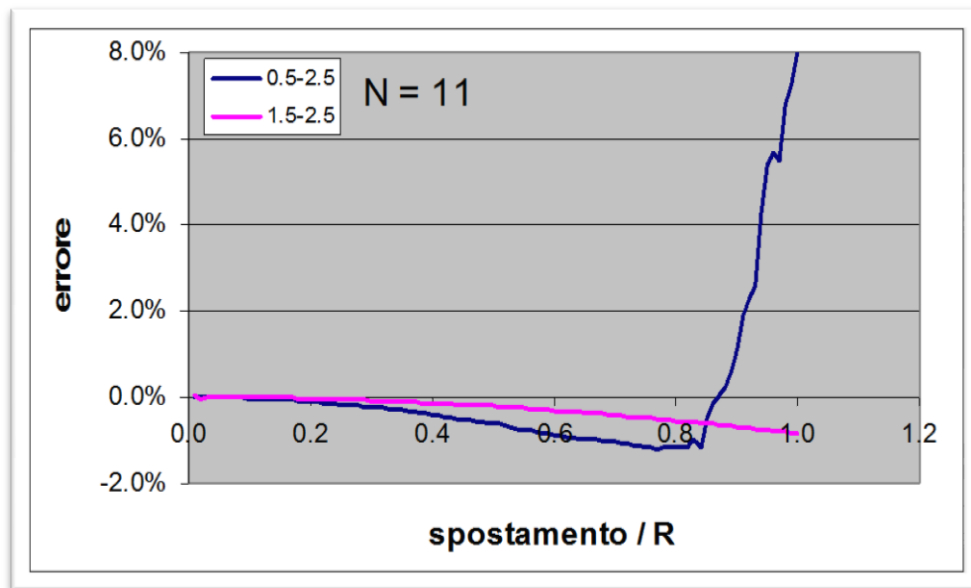


Figura 119 – Grafico della variazione dell'errore percentuale commesso utilizzando due intervalli diversi di integrazione

Viene confermata la riduzione dell'errore ottenuta spingendo verso valori più elevati l'estremo inferiore di integrazione ρ_0 . In ogni caso per $\rho_0 \geq 0.5$ l'accuratezza è più che adeguata per aperture di fessura non più grandi di qualche millimetro ($r < 0.8 \cong 4-5$ mm).

A questo punto bisogna considerare un altro aspetto che potrebbe influire sull'accuratezza di questo metodo di misurazione: il problema del centraggio. Individuare esattamente il centro O tra i due centri dei retini (1 e 2) non è affatto semplice sul fessurimetro moiré. Questo accade perché nello strumento non è presente alcun espediente che agevoli l'individuazione di tale punto, dato che non è stato pensato per il tipo di analisi che viene proposta in questa tesi.

Considerando questa premessa, bisogna accettare il fatto che nell'analisi informatica delle fotografie del fessurimetro sarà inevitabile, almeno prima dello sviluppo dello strumento, commettere un qualche errore di centraggio, anche se, ovviamente, si tenderà in tutti i modi a minimizzarlo. Con tutta evidenza allora l'analisi delle frange di interferenza partirà da un punto, che viene chiamato O', che non sarà esattamente coincidente con O. La distanza tra O ed O' prende il nome di d , mentre ρ diventa ρ' e θ diventa θ' . Il piccolo angolo che si viene a formare tra ρ e ρ'

prenderà invece il nome di δ . Utilizzando nuovamente il teorema del coseno si riescono a calcolare le relazioni tra queste grandezze.

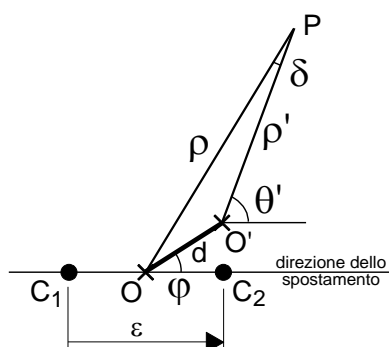


Figura 120 – Il punto O' e le sue relazioni con il punto O

In questa sede ci si occupa in maniera preventiva di capire quanto un errore di centraggio possa influenzare il dato finale che emerge dall'analisi. Conoscendo da subito la sua influenza si può approssimare la creazione di un sistema predisposto all'individuazione del centro O sapendo entro quali risultati è necessario contenere l'errore.

Per arrivare a fare queste considerazioni sono stati svolti dei conti di prova imponendo un errore conosciuto per tanti spostamenti dei retini e confrontando i risultati con quelli ottenuti senza errore di centraggio. Sono state fatte prove contemporaneamente per errori di centraggio nella direzione dello spostamento ($\varphi=0$) e nella direzione ortogonale a questa ($\varphi=\pi/2$) per comprendere quale delle due componenti dell'errore di centraggio sia più pericolosa per l'accuratezza di questo metodo. Attraverso questi calcoli si è notato come influisca maggiormente sul valore dello spostamento un errore di centraggio nella direzione dello spostamento ($\varphi=0$) perché modifica proprio l'ampiezza della curva cosinusoidale delle fasi, ovvero proprio il dato dell'ampiezza dello spostamento.

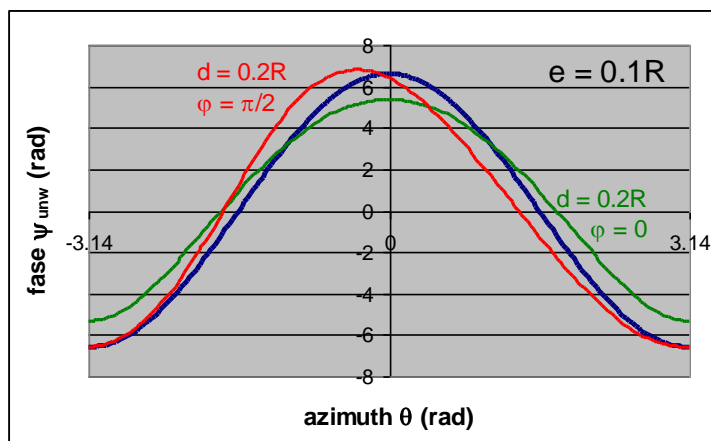


Figura 121 – Grafico delle fasi ottenute senza errore di centraggio (in blu); con un errore pari a $0.2 R$ nella direzione dello spostamento (in verde) e con un errore pari a $0.2 R$ in direzione ortogonale a quella dello spostamento (in rosso)

3.1.5_ Il programma di elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré

In principio è stata discussa un'analisi delle frange di interferenza del fessurimetro moiré che fosse in grado di arrivare all'individuazione di uno spostamento fisico partendo dal baricentro dei due retini dello strumento. Successivamente si è cercato di delineare quale potesse essere l'ordine di grandezza dei piccoli errori che derivavano dalle approssimazioni matematiche che sono state fatte nel corso di quell'analisi e, in chiusura del paragrafo 3.1.4, anche di quelli che si sarebbero potuti generare da piccoli errori proprio nell'individuazione del baricentro dal quale parte l'analisi.

A questo punto si è iniziato a ragionare sulla reale elaborazione dello strumento fisico. L'analisi dei fessurimetri moiré si effettua su fotogrammi che catturano lo strumento ed i disegni di interferenza che vengono creati dalla sovrapposizione dei suoi retini di cerchi concentrici.

Innanzitutto occorre trovare un metodo per individuare il baricentro dei due retini, punto dal quale si svolge la successiva elaborazione delle immagini. Lo strumento (*Moiré TellTales*) attualmente non prevede alcuna facilitazione nell'individuazione di tale punto ed è stato indispensabile perciò trovare un metodo che svolgesse tale compito. Già questa operazione è tutt'altro che scontata. L'idea che è stata sviluppata, e che si è rivelata sufficientemente precisa, è la seguente: il programma informatico "chiede" all'operatore di selezionare, sul fotogramma che contiene il fessurimetro moiré, un punto quanto più prossimo possibile al baricentro che si sta cercando; da quel punto comincia una prima analisi dell'immagine che indaga su tantissimi raggi l'alternanza di chiari e scuri. Ponendo i giusti filtri in questa ricerca si riescono ad individuare con buona precisione i quattro *marker* (segni angolari a "L") e più precisamente il loro angolo interno.

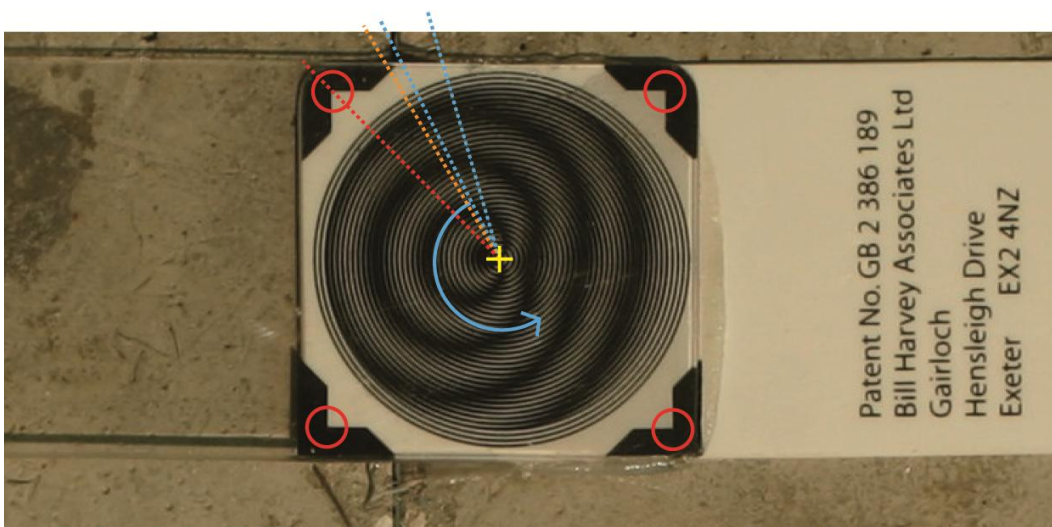


Figura 122 – Individuazione del baricentro dei retini. Le linee in azzurro segnalano i raggi per i quali non viene mai trovata una zona di nero pieno; in arancio si vede un raggio che trova questo nero ed in rosso si vede il raggio che individua il nero ad una distanza maggiore: quello sarà l'angolo che si stava cercando

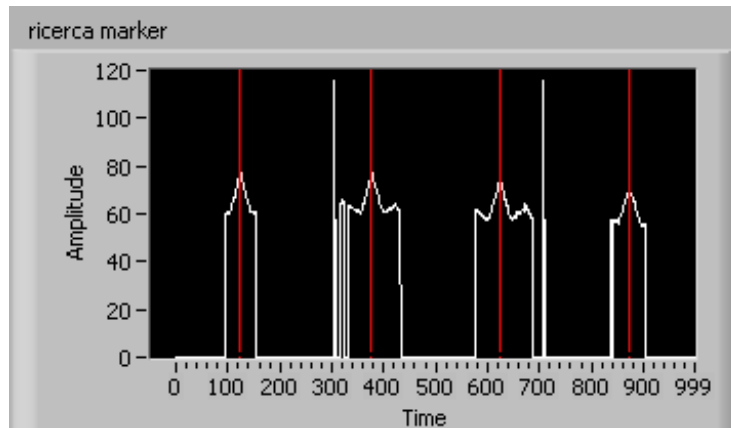


Figura 123 – La finestra del programma informatico che esprime il grado di similitudine tra un'alternanza di chiari e scuri imposta come obiettivo della ricerca e l'alternanza reale che si trova nell'immagine che si sta elaborando. In questo modo si riescono ad identificare i marker del fessurimetro (picchi)

Da questi punti partono automaticamente le congiungenti diagonali. Il baricentro dell'immagine è semplicemente il punto medio del segmento che congiunge i due punti medi delle diagonali. Questi passaggi sono strettamente necessari dal momento che i quattro *marker*, appartenendo due ad un componente e due all'altro, si avvicinano e si allontanano così come i retini e per questo il centro non è mai rappresentato al punto di incontro delle due diagonali (è vero solamente quando i due retini sono sovrapposti in maniera esatta).

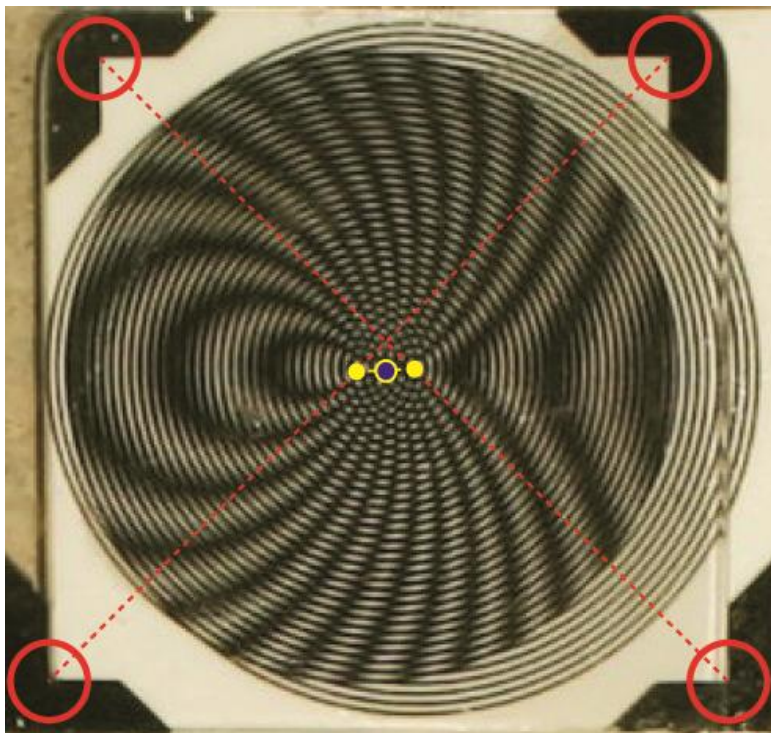


Figura 124 – Il baricentro dei retini come punto medio della congiungente dei punti medi delle due diagonali individuate dai marker

Contemporaneamente all'individuazione dei segni angolari del fessurimetro il programma informatico svolge anche un'altra analisi tesa ad individuare una direzione di riferimento rispetto alla

quale verrà poi calcolato l'angolo della direzione dello spostamento. Sempre indagando la sequenza di chiari e scuri il programma riesce a capire che oltre uno dei quattro lati del rettangolo improprio formato dai segni angolari si trova una zona bianca: il colore del componente inferiore del fessurimetro. Dopo gli altri tre lati di questo rettangolo si troveranno invece zone "meno bianche" della precedente, qualunque sia lo sfondo dell'immagine. Individuato il componente bianco viene facilmente calcolata la direzione di riferimento come direzione a 45° rispetto alla direzione della diagonale che unisce il primo *marker* che sottende il lato bianco ed il suo opposto. La congiungente tra baricentro e questo punto sarà la direzione di riferimento per l'individuazione della direzione dello spostamento.

Adesso inizia l'analisi vera e propria delle frange di interferenza del fessurimetro ed il procedimento con il quale si svolge è esattamente lo stesso che è stato spiegato nel paragrafo 3.1.4.

In breve dal baricentro partono tantissimi raggi che interrogano l'immagine ed individuano l'andamento dei chiari e dei scuri con una curva cosinusoidale. Di ognuna di queste numerose curve si ricava la fase. La sequenza dei valori delle fasi lungo i diversi raggi forma un'altra curva con andamento cosinusoidale che esprime l'ampiezza e la direzione dello spostamento avvenuto tra i due retini. Per un approfondimento su questa analisi si rimanda al paragrafo 3.1.4., che si occupa in maniera specifica proprio di questo tema.

Se il processamento dell'immagine è avvenuto correttamente si notano quattro cerchi rossi che individuano gli angoli dei *marker*, un cerchio verde che segnala il baricentro calcolato, una linea blu che individua la direzione di riferimento ed una rossa che rappresenta invece la direzione dello spostamento avvenuto. Il valore dello spostamento viene salvato automaticamente in una cartella di lavoro. Subito dopo si può passare all'elaborazione dell'immagine successiva.

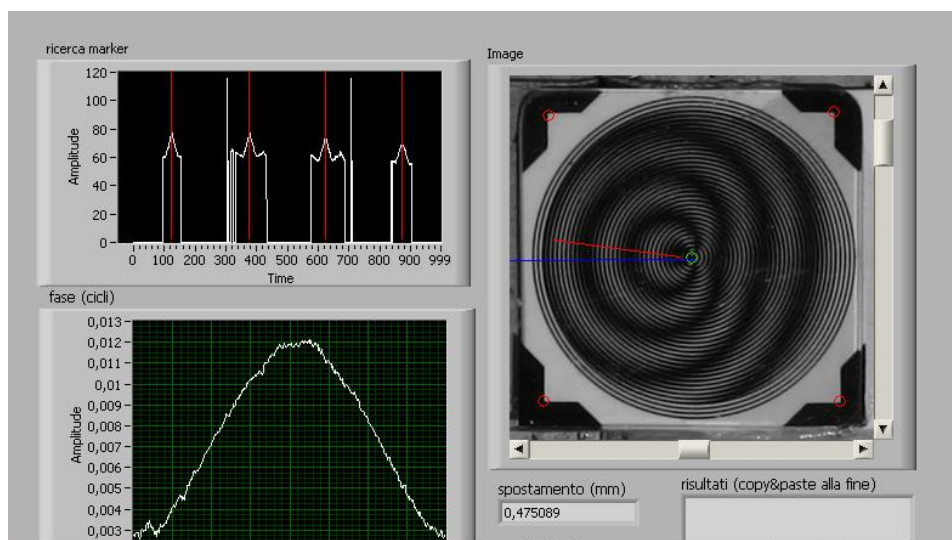


Figura 125 – Una schermata tipo del programma informatico che elabora i retini dei fessurimetri moiré

3.2_Metodo dell'analisi delle immagini digitali

Il secondo metodo per la misurazione degli spostamenti che presenta carattere di novità nel panorama del monitoraggio statico delle fessure verrà chiamato metodo dell'analisi delle immagini. Questo metodo parte da un presupposto fondamentale: in termini generali si utilizza ogni fotogramma come una mappa dove si può risalire alle posizioni relative di alcuni piccoli oggetti che funzionano come mire e che appaiono al suo interno. Una griglia di riferimento nella stessa immagine consente di tenere conto della distanza e dell'inclinazione della ripresa. Questo tipo di indagine è logicamente legata alle recenti evoluzioni delle macchine fotografiche digitali, che, grazie al costante incremento della loro risoluzione, consentono di far crescere allo stesso tempo anche l'accuratezza che si può raggiungere con questo procedimento. Ovviamente il discorso è complesso e va discusso analiticamente in questa sede.

Il metodo dell'analisi delle immagini si articola in due fasi: la prima comprende la preparazione e l'esecuzione delle fotografie, mentre la seconda è l'analisi informatica vera e propria delle immagini acquisite.

3.2.1_La fase di preparazione ed acquisizione dei fotogrammi

E' stato affermato precedentemente che occorre svolgere dapprima una preparazione della superficie oggetto del rilievo. Il metodo che si propone utilizza sostanzialmente due categorie di oggetti che devono essere catturate in ogni fotogramma: una griglia di riferimento e delle mire. La griglia di riferimento, come dice la parola stessa, funziona appunto come punto di riferimento per calibrare il fotogramma, ovvero eliminare l'errore prospettico, scalare allo stesso modo le diverse immagini e definire l'origine degli assi x e y , che poi servirà come riferimento per ottenere la posizione esatta delle mire. Ovviamente questa griglia di riferimento, per poter adempiere correttamente a tutti i compiti assegnatili, deve presentare delle caratteristiche specifiche ben note da parte dell'operatore, e, ancora più importante, da lui correttamente inserite all'interno del programma per l'analisi dei fotogrammi. E' importante che le caratteristiche della griglia di riferimento siano note, ma non è importante che siano sempre le stesse. Ovviamente il fatto di utilizzare una griglia in maniera ripetitiva può presentare delle indubbie comodità, in quanto per un nuovo lavoro occorrerebbe semplicemente ristampare una griglia già predisposta e mantenere costanti le impostazioni del programma che dovrà analizzare le immagini.

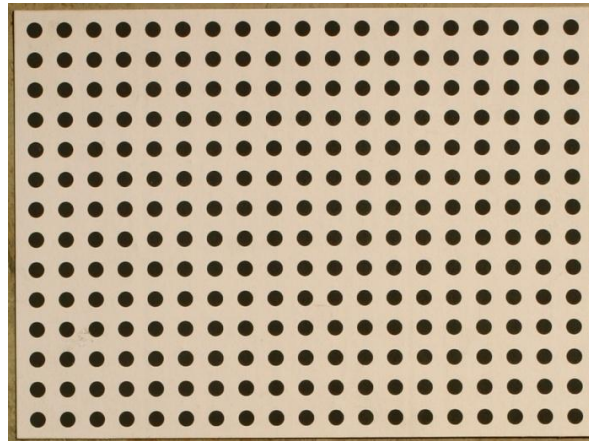


Figura 126 – Una griglia di riferimento per l’analisi delle immagini

La specifica griglia di riferimento che si può vedere qui sopra è (seppur scalata) quella che è stata utilizzata sia nella prova in laboratorio che nelle misurazioni sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate (VA), che sono oggetto specifico dei prossimi capitoli di questa tesi. La griglia di riferimento viene ritagliata da una stampa (più o meno ampia) a seconda delle caratteristiche fisiche del supporto su cui deve essere applicata o ad altre particolarità dello specifico oggetto di studio. Dunque le sue dimensioni non sono sempre le stesse, anche se è importante non ridurla a poche righe e poche colonne. Quello che non muta è il passo dei pallini neri che la compongono: nelle prove che verranno discusse ogni pallino sarà distanziato da quelli accanto di esattamente 8 mm e questa è un’informazione fondamentale per il programma che analizza le immagini.

La griglia di riferimento è in sostanza un foglio di carta e può capitare che sia opportuno in sito incollarla preventivamente su di un supporto che la renda meno delicata e meno deformabile. E’ comunque molto importante che essa si trovi sullo stesso piano delle mire, per non incrementare le imprecisioni dei dati finali.



Figure 127 e 128 – A sinistra la griglia di riferimento direttamente incollata sulla superficie; a destra invece preventivamente incollata su di un supporto metallico a sua volta fissato sulla muratura

Bisogna ricordare come non sia la forma geometrica del pallino né tantomeno uno specifico colore a funzionare come riferimento di misura, lo sono invece il passo di queste forme e la loro disposizione in file e colonne ordinate. Queste caratteristiche rendono possibile l'individuazione di assi cartesiani, ed anche lo svolgimento di tutte le altre operazioni descritte precedentemente, durante l'analisi informatica. La forma ed il colore servono solamente durante la fase di "riconoscimento" delle mire che svolge il programma informatico, e di cui si parlerà in seguito.

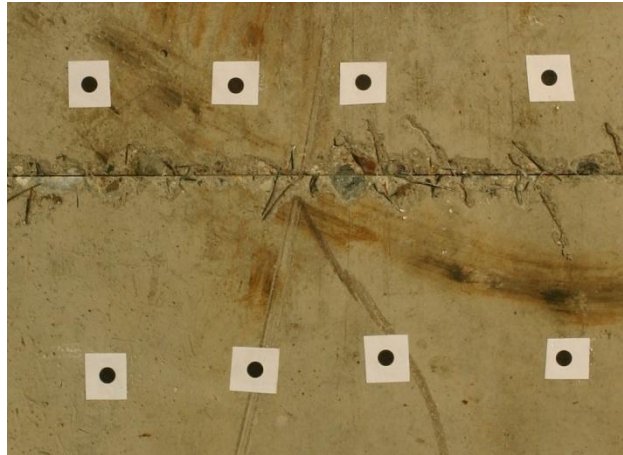


Figura 129 – Quattro coppie di mire incollate

Le mire, invece, costituiscono proprio i punti di cui misurare la posizione, dalla quale poi si ricavano direttamente le lunghezze delle basi e, di conseguenza, anche gli spostamenti relativi. Per base si intende la lunghezza che intercorre tra due mire che formano una coppia (nell'immagine qui sopra ad esempio la prima mira in alto a sinistra insieme con la prima in basso a sinistra). Queste mire nelle prove dei prossimi capitoli sono pallini geometricamente identici ai precedenti che però vengono tagliati singolarmente e poi applicati sul manufatto oggetto del rilievo. Non c'è bisogno che la posizione di queste mire sia particolarmente precisa, ma quello che conta è che vengano considerate a due a due, e che una stia da una parte della fessura e l'altra dalla parte opposta. Le mire possono essere stampate su carta normale e poi incollate, oppure direttamente stampate su carta adesiva. Come si può notare non è importante che l'allineamento delle due mire che formano una coppia sia perfetto, né che esse stiano ad una distanza nota l'una dall'altra, perché il programma informatico ne individua comunque la posizione in coordinate x e y , e successivamente, utilizzando solamente il dato della coordinata che esprime lo spostamento perpendicolare all'andamento della fessura, calcola la nuova lunghezza della base ed ottiene la grandezza dello spostamento relativo. Senza tenere conto dello spostamento lungo la x delle mire sarebbe, per assurdo, possibile calcolare lo spostamento relativo tra la prima mira in alto a sinistra e l'ultima in basso a destra, allo stesso

modo di come lo si calcola per due mire corrispondenti, partendo dal presupposto che tutto deriva dalla differenza di due valori di y .

Di seguito si può vedere una figura che aiuta a comprendere meglio i passaggi appena descritti.

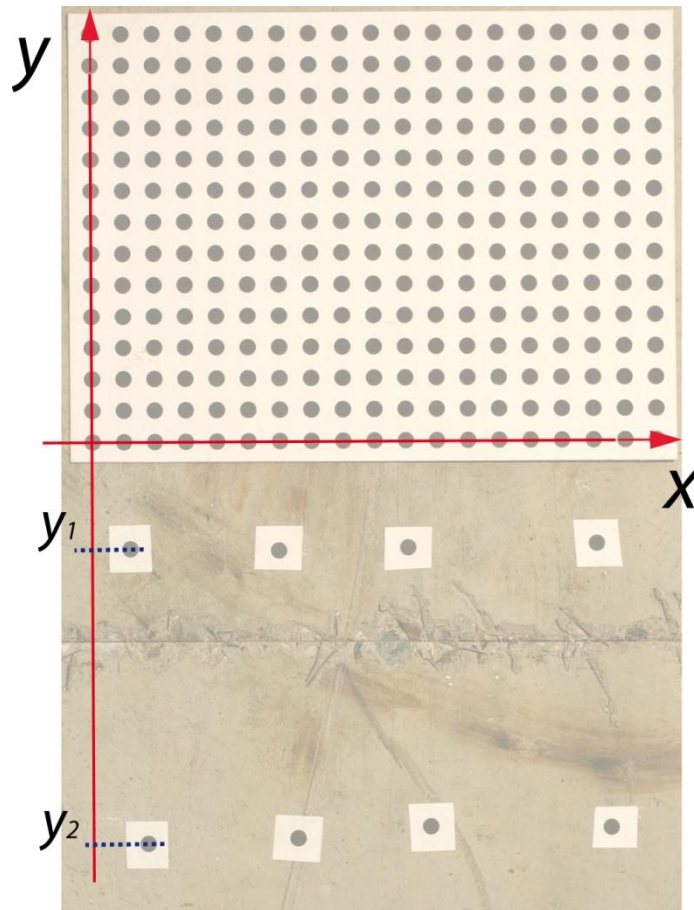


Figura 130 – Schematizzazione del procedimento logico del metodo dell'analisi delle immagini

Dalla differenza delle due y viene ricavata per ogni fotogramma la distanza tra le due mire (base) e subito dopo l'incremento o la diminuzione della stessa rispetto alla lunghezza d'origine. L'operazione si svolge automaticamente non solo per la prima coppia di mire, ma per tutte quelle che interessano all'interno dell'immagine.

Prima di concludere la trattazione della prima fase del metodo dell'analisi delle immagini occorre spendere due parole anche sulla macchina fotografica con la quale si prendono i fotogrammi, sui punti di presa fotografica ed anche sugli strumenti accessori come cavalletti o riflettori. Innanzitutto si vuole ricordare che non è indispensabile che la posizione dalla quale si scattano le varie fotografie sia sempre esattamente la medesima, perché ad ogni modo l'analisi successiva calibra e scala l'immagine grazie alla griglia di riferimento. È importante, però, che la distanza non vari in maniera

significativa, perché si potrebbe modificare la definizione della stessa immagine, che è in assoluto il parametro più importante che definisce l'accuratezza finale della misurazione. Ovviamente la risoluzione di una fotografia non dipende unicamente dalla distanza dalla quale la si scatta, ma anche, e soprattutto, dalla macchina fotografica che si utilizza. Una macchina fotografica, ad esempio, che ha una risoluzione di 12 *Megapixel*, ovvero 12000000 *Pixel*, restituisce immagini composte da 3000 righe e 4000 colonne di *Pixel*. Risoluzioni di questo tipo sono ad oggi piuttosto comuni per le macchine fotografiche in commercio, quindi non è affatto indispensabile il possesso di uno strumento particolare e neanche alcuna spesa ingente.

Comprendendo il fatto che la posizione di presa dei fotogrammi può variare, si può capire come un cavalletto possa tornare utile solo nel caso in cui l'operatore voglia sentirsi particolarmente sicuro della risoluzione della fotografia che deve scattare. Può capitare, infatti, che scattando diverse fotografie, alcune, una volta ingrandite, presentino una risoluzione migliore di quella delle altre prese con la stessa macchina fotografica ad una distanza molto simile. Questo fatto è direttamente collegato alla stabilità dell'operatore nel momento dello scatto: una piccola indecisione in quel momento peggiora, anche se di poco, la risoluzione e può influire sulla precisione del dato dello spostamento che emergerà poi.

Infine è consigliabile utilizzare un riflettore che ottimizzi l'illuminazione in tutti quei casi in cui si hanno condizioni di illuminazione non soddisfacente. Viceversa occorrerà filtrare in qualche modo la luce nei casi in cui si possano verificare fenomeni di abbagliamento. Qualche scatto di prova può fornire indicazioni sull'adeguatezza del grado di illuminazione che è presente in sito.

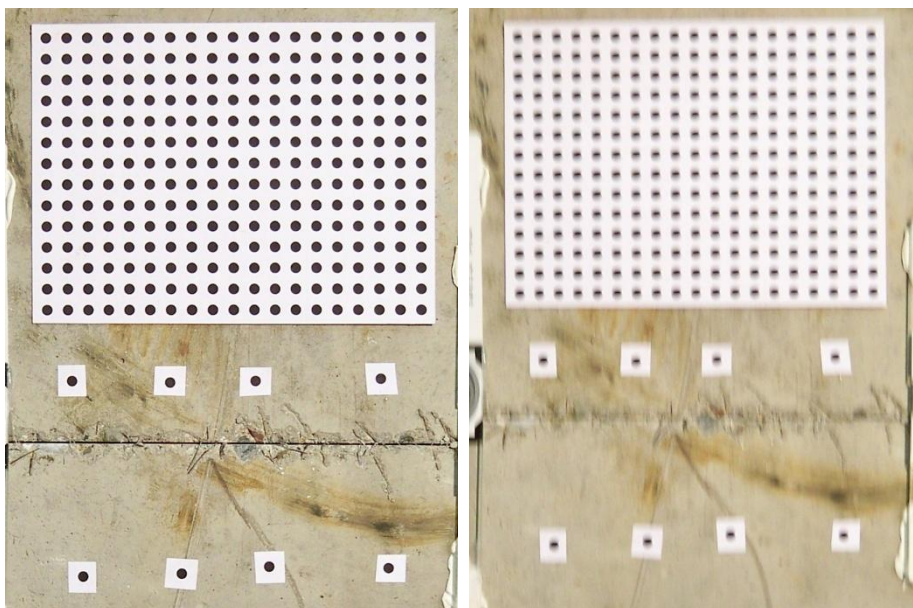


Figure 131 e 132 – Confronto tra due fotografie scattate in maniera analoga: da posizione molto simile, dallo stesso operatore, con le stesse condizioni di illuminazione. A destra si può notare come una leggera indecisione abbia compromesso la definizione del fotogramma

In chiusura si vuole fare riferimento ad un piccolo stratagemma che può facilitare molto il lavoro dell'operatore in sede di analisi delle immagini (seconda fase): in un angolo "libero" delle fotografie è meglio giustapporre un piccolo adesivo che indichi all'interno di tutti i fotogrammi un'informazione chiave che serva per riconoscerla in maniera inequivocabile in ogni momento (ad esempio la data o un numero progressivo dei sopralluoghi o il dato dello spostamento letto con un trasduttore che analizza contemporaneamente lo stesso spostamento, ...). In questo modo si riduce il rischio di confondere tra loro immagini che sono effettivamente molto simili tra loro, in quanto catturano lo stesso oggetto ad una stessa distanza con una illuminazione analoga.

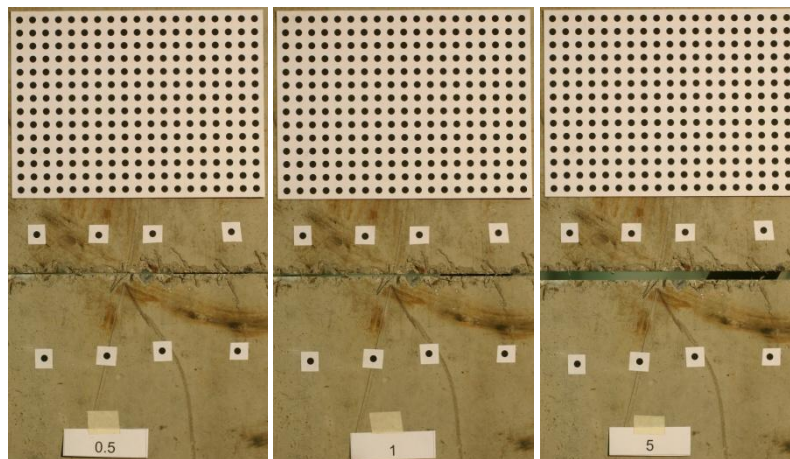


Figure 133, 134 e 135 – Una serie di 3 fotografie simili facilmente riconoscibili tra loro grazie ad un piccolo pezzo di carta che inserisce inequivocabilmente un'informazione chiave al loro interno

3.2.2_La fase di analisi informatica dei fotogrammi acquisiti

Una volta terminata la fase di acquisizione dei fotogrammi il lavoro si sposta dal sito ad una postazione computer. L'elaborazione, che potrebbe essere svolta attraverso un computer portatile anche subito in sito, avviene in maniera molto veloce perché il programma la esegue automaticamente a fronte solo di pochi comandi da inserire. Adesso si tenterà di spiegare tutti i passaggi del programma in questione.

Come prima cosa bisogna aprire il programma e caricare le fotografie che si vogliono analizzare. Il programma prevede un riquadro dove si ha la possibilità di specificare quali immagini si desidera analizzare provenienti da una stessa cartella. Nello stesso riquadro bisogna specificare il nome del foglio di lavoro dove verranno automaticamente inseriti in maniera ordinata i dati ricavati durante l'analisi.



Figura 136 – Il riquadro dove inserire le specifiche delle immagini da analizzare e del foglio di lavoro da creare

Sempre nello stesso riquadro (che si può vedere qui sopra) va inserito il dato che esprime la distanza tra le colonne degli elementi della griglia di riferimento (in micron). Ad esempio il dato che vediamo inserito è 30000 micron, che equivale a 30 mm. Questa informazione è assolutamente fondamentale per impostare correttamente l’analisi: subito dopo il programma è in grado di calibrare l’immagine. Con il termine calibrazione vengono racchiuse tre operazioni distinte, che però avvengono allo stesso tempo:

- Eliminazione dell’errore prospettico;
- Scalatura dell’immagine;
- Definizione dell’origine degli assi x e y.

Il passaggio successivo prevede la memorizzazione informatica delle mire. In sostanza bisogna “insegnare” al programma quali sono gli oggetti che deve cercare per poi fornirci i dati circa la loro posizione. Innanzitutto si seleziona una piccola zona dell’immagine che contenga il pallino nero di una mira. Dopodiché si seleziona un’altra zona dell’immagine più ampia che contenga tutte le mire



Figure 137 e 138 – Il riquadro dove inserire le specifiche delle mire da ricercare e quello dove disegnare le zone da analizzare dell’immagine

(la vediamo in verde nell'immagine nella pagina precedente); si immette il dato di quante mire il programma deve ricercare (*n. di Targets*) ed a questo punto si da il comando "Ricerca mire". Il programma immediatamente trova, all'interno di questa zona, il numero di oggetti inseriti aventi matrice più simile a quella dell'originale. E' possibile anche diminuire la precisione di questa ricerca per consentire al programma di trovare non solo gli oggetti identici, ma anche quelli molto simili proprio all'originale. Questa accuratezza nella ricerca si può esprimere in millesimi (1000=100%).

La parte più corposa dell'analisi è fatta e si trovano già in questo momento le coordinate delle mire in *Pixel (x; y)*, che vengono automaticamente trasformate in distanze reali grazie alla scalatura della prima fase. Ovviamente migliore è la definizione della fotografia e meglio il programma riconosce gli oggetti; si può effettuare così la ricerca per somiglianza con una percentuale più elevata ed anche le coordinate (sia in *Pixel* che in micron) saranno più attendibili.

Occorre ricordare in ultima istanza come non ci interessi la lunghezza delle basi o le coordinate delle mire, vogliamo semplicemente avere informazioni sugli spostamenti relativi.

Per il momento non viene fornito nessun dato circa l'accuratezza delle misure che si potrebbe ottenere con questo metodo, in quanto la sua individuazione rappresenta uno degli scopi principali della prova in laboratorio che viene descritta nel prossimo capitolo ed anche delle misurazioni sulla torre campanaria di S.Vittore ad Arcisate, oggetto invece del quinto capitolo.

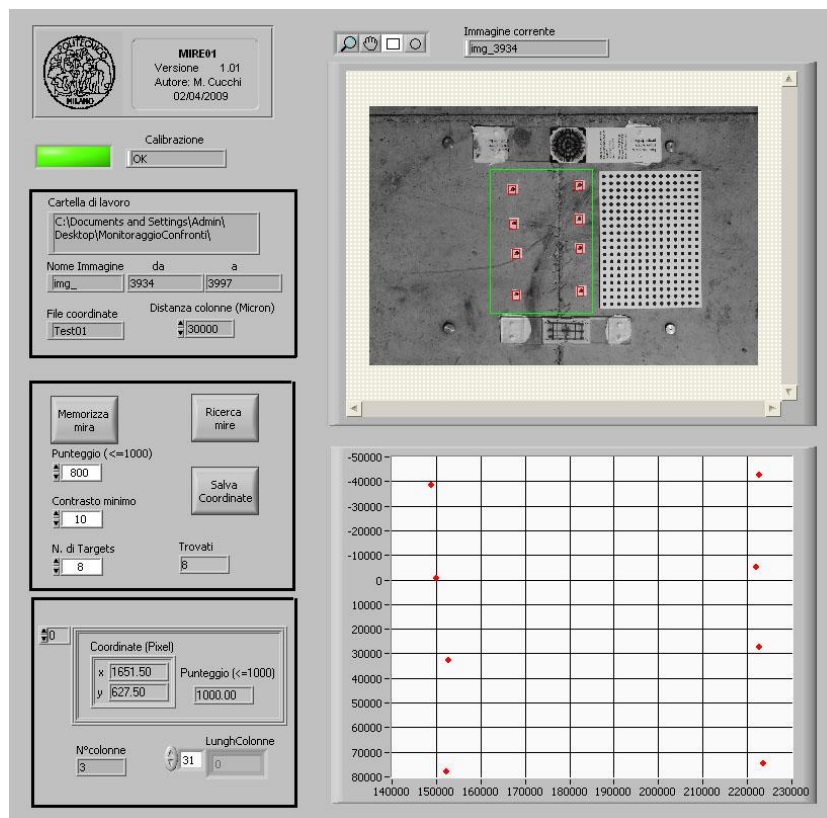


Figura 139 – La schermata completa del programma che analizza le immagini

Il prodotto finale di questo metodo è un foglio di lavoro che presenta le seguenti caratteristiche: due colonne per ogni singola mira in cui vengono espresse le sue coordinate (x, y); una colonna che esprime la lunghezza di ogni base (coppia di mire); una colonna che esprime la differenza tra la lunghezza della base misurata in quel fotogramma con quella dell'immagine di partenza, ovvero lo spostamento relativo avvenuto. Le righe invece corrispondono ognuna ad un diverso fotogramma inserito nel programma di analisi.

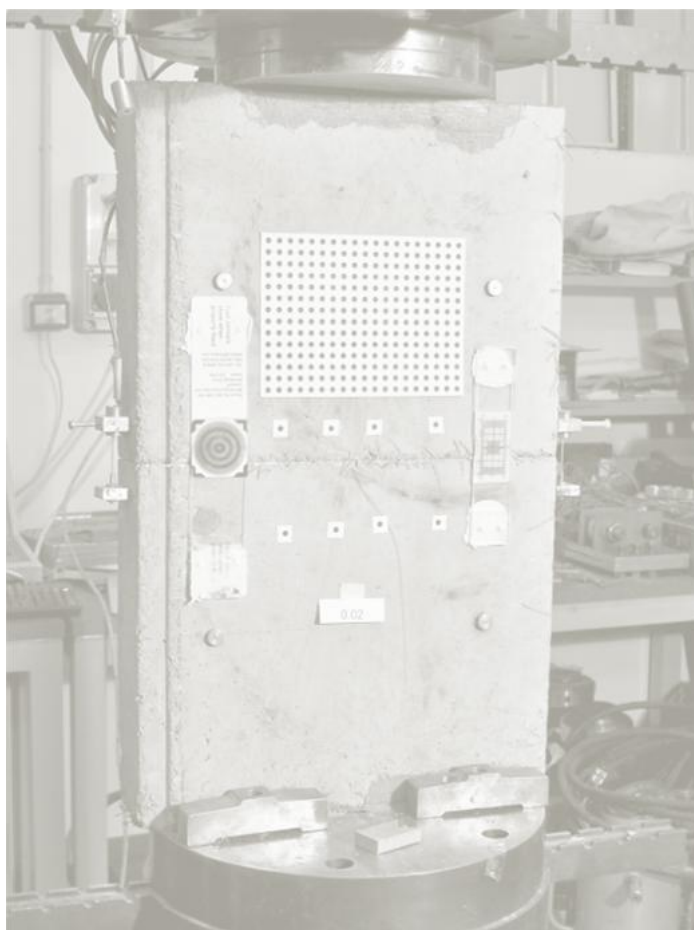
Giustamente è stato segnalato tutto quello che viene riportato nel foglio di lavoro, anche se i soli dati che interessano sono gli ultimi, ovvero quelli che fanno riferimento agli spostamenti relativi avvenuti, espressi in millimetri, con una risoluzione che arriva fino al micron (terzo decimale).

Fotogramma	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4
000001.jpg	-102630	13302	-101372	51536	-98505	85366	-98869
000002.jpg	-102633	13869	-101375	52101	-98508	85932	-98871
[...]
000015.jpg	-102404	13571	-101152	51805	-98285	85636	-98653
000016.jpg	-102556	13411	-101302	51650	-98439	85480	-98810

y_4	x_5	y_5	x_6	y_6	x_7	y_7	x_8	y_8
131369	-27682	9292	-28188	47225	-27545	80214	-26649	128357
131962	-27687	9858	-28193	47792	-27549	80778	-26653	128922
...
131667	-27359	9602	-27868	47531	-27233	80520	-26331	128661
131514	-27503	9449	-28011	47381	-27367	80367	-26479	128509

$LB a$	$LB b$	$LB c$	$LB d$	$\Delta B a$	$\Delta B b$	$\Delta B c$	$\Delta B d$
74947	73182	70959	72220	0,000	0,000	0,000	0,000
74945	73181	70958	72217	-0,002	-0,001	-0,001	-0,003
...
75047	73283	71061	72321	0,099	0,101	0,102	0,101
75052	73290	71072	72331	0,105	0,108	0,112	0,111

Tabella 7 – Esempio del foglio di lavoro che rappresenta il prodotto finito dell'analisi delle immagini. Per ogni fotogramma si riportano i valori delle coordinate delle mire (x, y), la lunghezza calcolata delle basi (LB) ed infine lo spostamento relativo per ogni base (ΔB). I valori riportati sono solamente un esempio



Quarto Capitolo

**VERIFICHE IN LABORATORIO SULL'ACCURATEZZA DEI
METODI DI MISURAZIONE**

4.1 Introduzione

La tesi che si propone ha in sé una doppia valenza: da un lato investigare i metodi di monitoraggio statico delle fessure già conosciuti ed utilizzati insieme con quelli che stanno emergendo e sono ancora poco diffusi, e dall'altro sperimentare e perfezionare proprio le nuove applicazioni per ottimizzarle e per capire vantaggi e svantaggi di una loro applicazione in questo particolare campo della verifica statica degli edifici esistenti. Una volta comprese le potenzialità di uno dei nuovi metodi si dovrà procedere in maniera tale da perfezionarlo per poi tornare sui propri passi e svolgere nuovamente un confronto con quelli che vengono definiti *standard*.

Come punto di partenza per ambedue le finalità sarebbe stato opportuno organizzare una prova sperimentale in laboratorio che studiasse proprio i diversi metodi di monitoraggio delle fessure (o degli spostamenti bidimensionali planari in generale) facendo principalmente riferimento alla verifica dell'accuratezza nella misurazione di questi movimenti bidimensionali.

La possibilità che offre una prova di questo tipo è quella di misurare con i diversi strumenti degli spostamenti noti e verificati in prima istanza dai valori ricavati con i trasduttori induttivi, ritenuto il metodo di misurazione più attendibile tra quelli disponibili. La misura letta sugli altri strumenti (o derivata indirettamente dagli stessi) non sarebbe così più stata un'informazione utile in quanto indicatrice di uno spostamento che si vuole conoscere, bensì sarebbe stata studiata in confronto con quella dello spostamento ormai noto, per dedurre delle informazioni fondamentali sul grado di accuratezza che ognuno di questi metodi di misurazione può fornire.



Figura 140 – Pressa elettromeccanica Instron 8562

Stabiliti i requisiti della prova, rimaneva da decidere il procedimento empirico e gli strumenti che avrebbero dato luogo a tutto questo. Per queste finalità è stata idonea una pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron* modello 8562, presente nei laboratori del dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano. Questa macchina è in grado di applicare delle forze o degli spostamenti inseribili nel sistema mediante un'interfaccia digitale.

Non tutto era stato ancora deciso, ma si sapeva che l'obiettivo sarebbe stato raggiunto utilizzando due blocchi, precedentemente separati (e che quindi non avrebbero opposto nessun impedimento in quanto privi di qualsiasi continuità) ed imponendo ad essi, grazie alla pressa *Instron* 8562, degli spostamenti preordinati che li avrebbero allontanati l'uno dall'altra. Non ci sarebbe stata alcuna trazione né alcuna compressione, ma solo moti liberi in senso opposto l'uno dall'altro.

4.1.1 Preparazione alla prova in laboratorio

Mercoledì 03/02/2010 è stato preso possesso del laboratorio dove si trova la pressa *Instron* 8562, al piano seminterrato del dipartimento di Ingegneria Strutturale, presso il Politecnico di Milano.



Figure 141 e 142 – Particolari della pressa elettromeccanica servocontrollata Instron 8562



Figure 143 e 144 – Particolari della pressa elettromeccanica servocontrollata Instron 8562

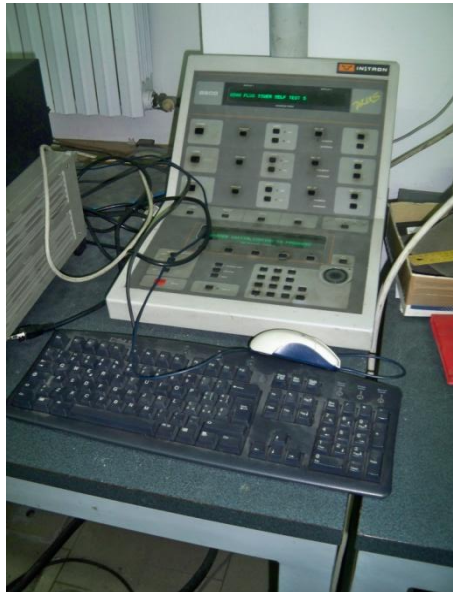


Figura 145 – Interfaccia digitale della pressa Instron 8562

E' stato deciso che sarebbe stato utilizzato per le prove un blocco di calcestruzzo già tagliato in maniera netta, e non solamente fessurato. Questo avrebbe permesso di movimentare con maggiore facilità le due parti, senza alcun impedimento, dato che la finalità è essenzialmente quella di verificare le diverse accuratezze dei diversi strumenti di misura per poterli poi confrontare tra di loro. Applicare sforzi su un unico blocco fessurato avrebbe disturbato lo studio in quanto non si avrebbe mai avuto uno spostamento perfettamente noto, ma in qualche maniera sempre influenzato dalla continuità del materiale non ancora completamente distaccato. E' stato perciò tagliato il blocco di calcestruzzo in due semiblocchi.



Figura 146 – Il piatto in acciaio avvitato sopra il piatto fisso della pressa Instron 8562

Prima di procedere con il taglio sono state svolte due piccole, ma preziose, operazioni. Per prima cosa sono stati fissati due piatti removibili in acciaio a quelli fissi della macchina. Su di quelli si sarebbero incollati i blocchi di calcestruzzo fibrorinforzato e si sarebbero svolte le prove. In secondo luogo si è cercato di definire un corretto posizionamento dei due blocchi durante la prova. Era preferibile fare questa operazione prima di eseguire il taglio perché si sarebbe potuto verificare in maniera diretta ed immediata la centralità del blocco sui piatti di acciaio inferiori e superiori. Per permettere questo posizionamento la pressa *Instron* 8562 ha due elementi che hanno delle punte che si estendono o si ritraggono avvitandole o svitandole. Su queste punte c'è segnata una scala metrica con risoluzione millimetrica.



Figure 147 e 148 – Punte estendibili utilizzate per verificare la centralità del blocco di calcestruzzo

Eseguito il taglio del blocco in due, è stata applicata una resina poliesteri bicomponente per ancoraggi chimici su una faccia di uno dei due blocchi che sarebbe stato incollato al piatto inferiore della macchina. Successivamente è stato appoggiato l'altro blocco sul precedente: il loro appoggio era piuttosto stabile dato che erano stati tagliati precisamente.



Figure 149 e 150 – Incollaggio del primo blocco di calcestruzzo sul piatto inferiore della Instron 8562

Prima di applicare la resina anche sul lato superiore del secondo blocco, si è comunque voluto fissare le due parti con due morsetti in maniera tale da avere maggiori garanzie di stabilità in fase di incollaggio.



Figure 151 e 152 – Fissaggio dei due blocchi di calcestruzzo con dei morsetti per stabilizzare la fase di incollaggio

Fissati i morsetti è stata stesa la resina anche sul secondo semiblocco. Poi è stato abbassato il piatto superiore della *Instron* fino a farlo aderire al lato con la colla, e si è proceduto applicando uno sforzo di compressione di circa 50 *daN*, mantenuto durante il periodo di asciugatura della resina, che la scheda del prodotto fissava attorno ai 20 minuti.



Figura 153 – Fissaggio di incollaggio dei blocchi di calcestruzzo sui piatti in acciaio della Instron 8562

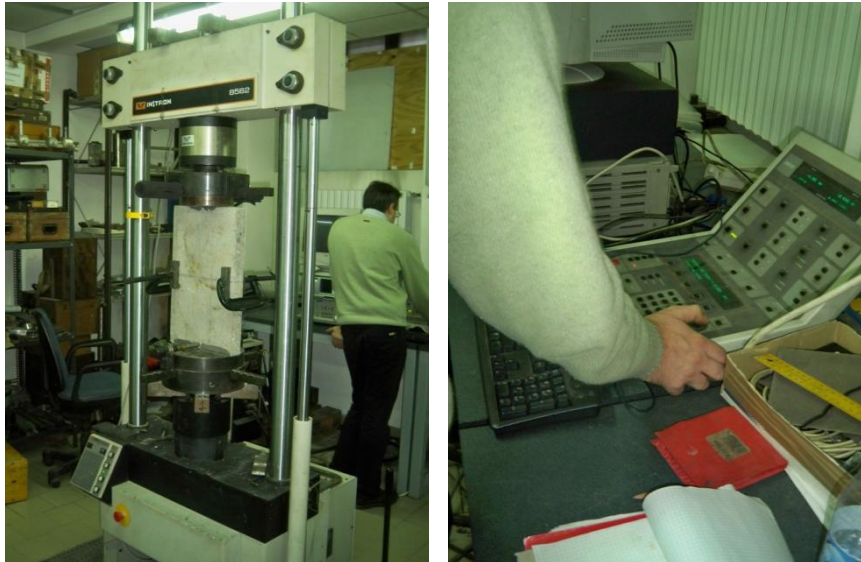


Figure 154 e 155 – Movimento della Instron 8562 per indurre uno sforzo di compressione che agevoli l'incollaggio

Una volta lasciato trascorrere il tempo necessario all'incollaggio dei due blocchi sui piatti in acciaio della pressa *Instron* 8562, sono stati tolti i morsetti. A questo punto i due semiblocchi erano perfettamente incollati sui due piatti della macchina e tra loro a contatto (ma non incollati).



Figura 156 – La superficie di contatto dei due blocchi di calcestruzzo

A questo punto si poteva procedere con l'applicazione di tutti gli strumenti che si volevano utilizzare in questa prova (o degli eventuali supporti degli stessi). I metodi da verificare nella giornata successiva di prove erano i seguenti:

- Trasduttori induttivi;
- Deformometro meccanico digitale;
- Fessurimetri piani;
- Fessurimetri moiré;
- Analisi delle immagini.

A questo punto bisognava decidere quali spostamenti applicare alla pressa *Instron* 8562. Necessitava avere misure successive che presentassero passi differenti. Occorreva un passo che si riducesse fino alla soglia del centesimo di millimetro ed allo stesso tempo si voleva coprire un fondo scala di osservazione che arrivasse fino ad un centimetro, una soglia piuttosto importante per quello che riguarda le normali fessurazioni che si presentano sugli edifici. E' evidente che per alcuni metodi sono particolarmente significativi degli spostamenti che per altri metodi risultano essere praticamente insignificanti. Dopo qualche ragionamento, è stato convenuto che si sarebbero ricavate le informazioni che occorrevo riguardo ai differenti metodi con i seguenti spostamenti in successione (alcune misure sono state prese anche "in discesa", ovvero scendendo dallo spostamento massimo di nuovo verso lo zero):

	Spostamenti Instron (mm)		Spostamenti Instron in discesa (mm)
1	0,01	20	7
2	0,02	21	5
3	0,04	22	4
4	0,06	23	3
5	0,08	24	2
6	0,1	25	1
7	0,2	26	0,5
8	0,5	27	0,2
9	1	28	0,1
10	1,02	29	0
11	1,04		
12	1,06		
13	1,08		
14	2		
15	3		
16	4		
17	5		
18	7		
19	10		

Tabella 8 – Gli spostamenti indotti sui due blocchi di cls attraverso la pressa elettromeccanica Instron 8562

4.2_Misure con i trasduttori induttivi

Il primo metodo che viene preso in analisi in merito alla prova eseguita nel laboratorio del dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano in data 05/02/2010 utilizza, come strumenti per misurare gli spostamenti, i trasduttori induttivi (LVDT). Questo metodo viene trattato come primo argomento del capitolo dal momento che viene ritenuto il sistema di misurazione più affidabile tra quelli disponibili. Pertanto la sua attendibilità porterà, d'ora in poi, a trattare proprio i valori degli spostamenti ricavati dai trasduttori induttivi come punto di riferimento anche per le valutazioni in merito all'accuratezza degli altri strumenti della prova, che saranno oggetto dei paragrafi seguenti.

I sensori induttivi di spostamento che sono stati utilizzati sono del tipo *W1ELA/0-2*. Essi vengono solitamente incorporati in macchinari, apparecchiature di prova e strumenti di misura. Questi sensori sono disponibili con classe di precisione 0,2 e frequenza portante 4,8 kHz.

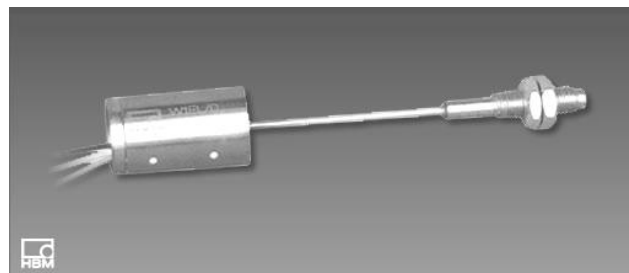


Figura 157 – Un trasduttore induttivo di spostamento

I sensori *W1ELA/0-2* sono costituiti dal corpo della bobina e dal nucleo estraibile. Il loro principio di misura è basato sulla bobina differenziale. Il corpo del sensore contiene due avvolgimenti di misura allineati assialmente uno dietro l'altro, in modo da formare un mezzo ponte induttivo, il quale viene completato a ponte intero nell'amplificatore a frequenza portante. Il campo di spostamento copre ambedue le direzioni, partendo dalla posizione di zero ed estendendosi fino allo spostamento nominale. Muovendo il nucleo, varia il valore dell'induttanza delle due bobine. La differenza dell'induttanza è la misura dello spostamento. Le caratteristiche dei trasduttori in questione sono le seguenti:

- Versione: a nucleo estraibile;
- Tipo di connessione: mezzo ponte;

- Sensibilità: $\pm 80 \text{ mV/V}$;
- Non linearità ed isteresi: $\pm 0,2 \%$;
- Grado di protezione: IP 20;
- Spostamento nominale: $0 \text{ mm} \dots \pm 1 \text{ mm}$;
- Campo nominale di temperatura: $-55 \text{ }^\circ\text{C} \dots + 130 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Frequenza portante: 4,8 kHz.

Il segnale elettrico in uscita viene letto su un interfaccia digitale e deve essere poi moltiplicato per una costante propria dello strumento che converte il dato elettrico in uno spostamento fisico.



Figura 158 – L'interfaccia digitale sulla quale avvengono le letture dei segnali elettrici

E' stato deciso di posizionare i trasduttori induttivi sullo spessore dei blocchi di calcestruzzo, ovviamente a cavallo della fessura. Si voleva inizialmente utilizzarne tre, ma poi si è deciso di applicarne solamente due: uno da una parte e uno dall'altra, anche in questo caso per diversificare le due letture e dare ad ognuna un significato maggiore.

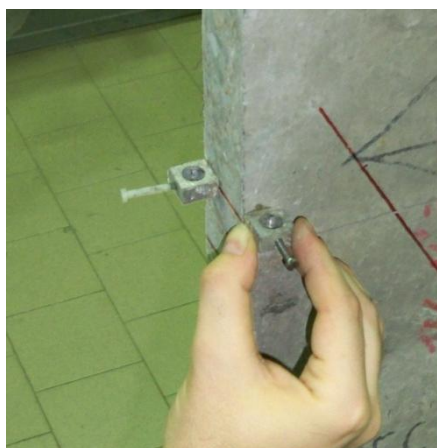


Figura 159 – Fase di incollaggio dei supporti metallici

I trasduttori induttivi del tipo *W1ELA/0-2* in dotazione hanno una base di misura di 5 cm ed un fondo scala di ± 2 mm, oltre il quale gli impulsi trasmessi perdono di significato. Gli strumenti elettrici sono stati posizionati sui blocchi di calcestruzzo grazie a dei piccoli supporti metallici che sono stati fissati con una colla cianoacrilica. Prima di procedere con l'incollaggio sono state segnate, con un pennarello indelebile di colore rosso, due linee per lato a 2,5 cm di distanza dalla fessura. In corrispondenza delle linee rosse sono stati posizionati gli elementi di supporto.



Figura 160 – I trasduttori induttivi fissati sui blocchi di calcestruzzo

La preparazione degli strumenti elettrici era completata. E' stata eseguita la prima lettura (0.00 mm) e subito dopo è stato possibile iniziare a muovere la pressa elettromeccanica *Instron* 8562. La sequenza degli spostamenti è la stessa che è stata descritta nel paragrafo precedente (4.1). Viene comunque riportata a lato della tabella che contiene i dati sugli impulsi. Per ogni spostamento venivano eseguite le due letture (A e B) e venivano riportati i dati su di una tabella predisposta a questa funzione. Il dato non rappresenta direttamente lo spostamento reale, ma un impulso elettrico che deve essere moltiplicato attraverso una costante di calibrazione che permette di passare dal valore letto alla grandezza fisica.

Sono state eseguite serialmente tutte le letture e così è stata completata la tabella senza imprevisti di nessun genere. Le letture sono state interrotte dopo la 15°, perché, giunti a 2 mm, gli strumenti non sono più in grado di misurare avendo raggiunto il proprio fondo scala. Si riportano i valori dei due trasduttori:

	Spostamenti Instron (mm)	Letture A	Letture B
01	0.00	-0.1819	-0.1716
02	0.01	-0.1693	-0.161
03	0.02	-0.1536	-0.1447
04	0.04	-0.1155	-0.1141
05	0.06	-0.0606	-0.0863
06	0.08	-0.0162	-0.0503
07	0.1	0.024	-0.0161
08	0.2	0.2464	0.1842
09	0.5	0.877	0.7784
10	1	1.937	1.7956
11	1.02	1.977	1.8342
12	1.04	2.0181	1.874
13	1.06	2.061	1.9137
14	1.08	2.1038	1.9548
15	2	4.0555	3.8382
16	3	-	-
17	4	-	-
18	5	-	-
19	7	-	-
20	10	-	-

Tabella 9 – I dati delle letture degli impulsi elettrici trasmessi dai due trasduttori induttivi

La costante di calibrazione (K) è propria di ogni trasduttore induttivo e la si calcola nel momento in cui si esegue la taratura dello strumento. Ad esempio i due coefficienti che sono stati utilizzati nelle trasformazioni sono 0,4875 per la lettura A e 0,499 per quanto riguarda la lettura B. Le prossime due tabelle rendono espliciti i passaggi della calibrazione dell'impulso elettrico per i due strumenti. Ciò che interessa calibrare non sono tanto le lunghezze, ma le differenze tra di esse, ovvero gli spostamenti in atto.

	Lettura A	Differenza	*K	Valore A (mm)
1	-0.1819	0	-	0,000
2	-0.1693	+ 0.0126	* 0.4875	0,006
3	-0.1536	+ 0.0283	* 0.4875	0,014
4	-0.1155	+ 0.0664	* 0.4875	0,032
5	-0.0606	+ 0.1213	* 0.4875	0,059
6	-0.0162	+ 0.1657	* 0.4875	0,081
7	0.024	+ 0.1843	* 0.4875	0,100
8	0.2464	+ 0.4283	* 0.4875	0,209
9	0.877	+ 1.0589	* 0.4875	0,516
10	1.937	+ 2.1189	* 0.4875	1,033
11	1.977	+ 2.1229	* 0.4875	1,052
12	2.0181	+ 2.2000	* 0.4875	1,073
13	2.061	+ 2.2429	* 0.4875	1,093
14	2.1038	+ 2.2857	* 0.4875	1,114
15	4.0555	+ 4.2374	* 0.4875	2,066
16	-	-	-	-
17	-	-	-	-
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	-	-	-	-

Tabella 10 – La conversione dei valori letti in spostamenti metrici per la lettura A

La tabella qui sopra (10) ha come oggetto i dati dello strumento A. Le quattro colonne riportano:

- Il valore dell'impulso elettrico letto sull'interfaccia;
- La differenza tra il valore letto ed il valore iniziale;
- La costante di calibrazione (K);
- Il valore metrico dello spostamento [= Differenza * K] (mm).

La tabella nella prossima pagina (11) presenta le stesse colonne e le stesse righe, ma fa riferimento allo strumento che è stato chiamato "B":

	Letture B	Differenza	*K	Valore B (mm)
1	-0.1716	0	-	0,000
2	-0.161	+ 0.0106	* 0.499	0,005
3	-0.1447	+ 0.0269	* 0.499	0,013
4	-0.1141	+ 0.0575	* 0.499	0,029
5	-0.0863	+ 0.0853	* 0.499	0,043
6	-0.0503	+ 0.1213	* 0.499	0,061
7	-0.0161	+ 0.1555	* 0.499	0,078
8	0.1842	+ 0.3558	* 0.499	0,178
9	0.7784	+ 0.9500	* 0.499	0,474
10	1.7956	+ 1.9672	* 0.499	0,982
11	1.8342	+ 2.0058	* 0.499	1,001
12	1.874	+ 2.0456	* 0.499	1,021
13	1.9137	+ 2.0853	* 0.499	1,041
14	1.9548	+ 2.1264	* 0.499	1,061
15	3.8382	+ 4.0098	* 0.499	2,001
16	-	-	-	-
17	-	-	-	-
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	-	-	-	-

Tabella 11 – La conversione dei valori letti in spostamenti metrici per la lettura B

Sono stati ottenuti così dei valori degli spostamenti realmente avvenuti tra i due blocchi di calcestruzzo. L’ultima tabella di questo paragrafo prenderà in considerazione entrambe le letture per farne una media. Il valore ottenuto sarà quello considerato reale e verrà utilizzato come riferimento per la verifica delle accuratezze di tutti gli altri strumenti di misura che sono stati considerati in questa prova in laboratorio.

L’ultima tabella ha anch’essa quattro colonne, dove si riportano:

- Spostamento della pressa *Instron* 8562 (mm);
- Valore metrico del trasduttore A (mm);
- Valore metrico del trasduttore B (mm);
- Media dei due valori metrici dei trasduttori (mm).

	Spostamenti Instron (mm)	Valore A (mm)	Valore B (mm)	Media Valori (mm)
01	0,00	0.000	0.000	0,000
02	0,01	0.006	0.005	0,006
03	0,02	0.014	0.013	0,014
04	0,04	0.032	0.029	0,031
05	0,06	0.059	0.043	0,051
06	0,08	0.081	0.061	0,071
07	0,1	0.100	0.078	0,089
08	0,2	0.209	0.178	0,193
09	0,5	0.516	0.474	0,495
10	1	1.033	0.982	1,007
11	1,02	1.052	1.001	1,027
12	1,04	1.073	1.021	1,047
13	1,06	1.093	1.041	1,067
14	1,08	1.114	1.061	1,088
15	2	2.066	2.001	2,033
16	3	-	-	-
17	4	-	-	-
18	5	-	-	-
19	7	-	-	-
20	10	-	-	-

Tabella 12 – Il valore metrico medio degli spostamenti avvenute sui due blocchi di cls messo a confronto con il dato immesso attraverso la pressa Instron 8562

Come è stato già affermato i valori ottenuti nella tabella qui sopra verranno utilizzati come termine di paragone per fare dei ragionamenti sulle accuratezze di tutti i metodi provati in laboratorio. Ovviamente i valori dei trasduttori non coprono tutte le misure in quanto si arrestano dopo la lettura n.° 15 (2 mm). Per gli spostamenti maggiori di quello si tornerà a considerare come termine di paragone il dato immesso sulla pressa Instron 8562.

4.3_Misure con il deformometro meccanico

Il secondo metodo di misurazione che viene trattato in questo capitolo, tra tutti quelli presi in considerazione nella prova eseguita in laboratorio al dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano, è la lettura attraverso il deformometro meccanico digitale. Il modello in dotazione era un *Huggenberger EDU II* (base 250 mm), di fabbricazione svizzera. Per il funzionamento tecnico dello strumento si rimanda al capitolo 2, nel quale si parla in maniera specifica anche di questo. Lo strumento in questione fornisce una lettura delle misure con una risoluzione che arriva fino al micron, ovvero il millesimo di millimetro, che avviene attraverso un *display* digitale. Gli spostamenti relativi non sono misurati direttamente, ma vengono ricavati dalla differenza che intercorre tra le diverse letture e la prima.



Figure 161 – Il deformometro meccanico Huggenberger EDU II e gli strumenti in dotazione nella valigetta

I due tastatori posti sulle estremità del comparatore sono dei punti chiave per il funzionamento dello strumento. Essi terminano con un piccolo elemento sferico che deve andare ad innestarsi esattamente nel foro che presentano delle apposite biffe (o basette), le quali devono essere saldamente incollate sulla muratura fessurata, a cavallo della fessura stessa, prima di eseguire qualsiasi misurazione. Questa prassi consente di diminuire l'instabilità dello strumento al momento della misurazione, riducendo molto gli errori che possono essere dovuti ai movimenti impercettibili dell'operatore che sta eseguendo la misura.

Sono state fissate due coppie di biffe sui due blocchi di calcestruzzo, i quali erano in quel momento già incollati saldamente sui piatti della *Instron 8562*. I due elementi che componevano una coppia stavano, come è logico, l'uno da una parte della fessura e l'altro dalla parte restante. Inoltre si è voluto mantenere i punti di misurazione il più lontano possibile, per aumentare il significato di

avere una doppia lettura e riuscire così a percepire anche i possibili fenomeni rotatori agenti sui blocchi in calcestruzzo della prova.

Le misure sono eseguite per mezzo di un comparatore e pertanto esse sono dei confronti tra la misura di un elemento noto, ovvero una dima (di azzeramento) in acciaio invar (base 250 mm), ed uno incognito (definito “misurando”). Il confronto avviene con un elemento in acciaio invar, metallo con un bassissimo coefficiente di dilatazione termica ($d = 0.0000015$; circa un decimo dell'acciaio), proprio per eliminare anche l'influsso delle variazioni di temperatura. Dalla misura di partenza (250 mm) il deformometro meccanico in questione è in grado di misurare lunghezze fino a ± 6 mm.



Figure 162 e 163 – Le due dime (di posizionamento e di azzeramento) a sinistra. A destra la scatola che contiene tutte le differenti basette a disposizione

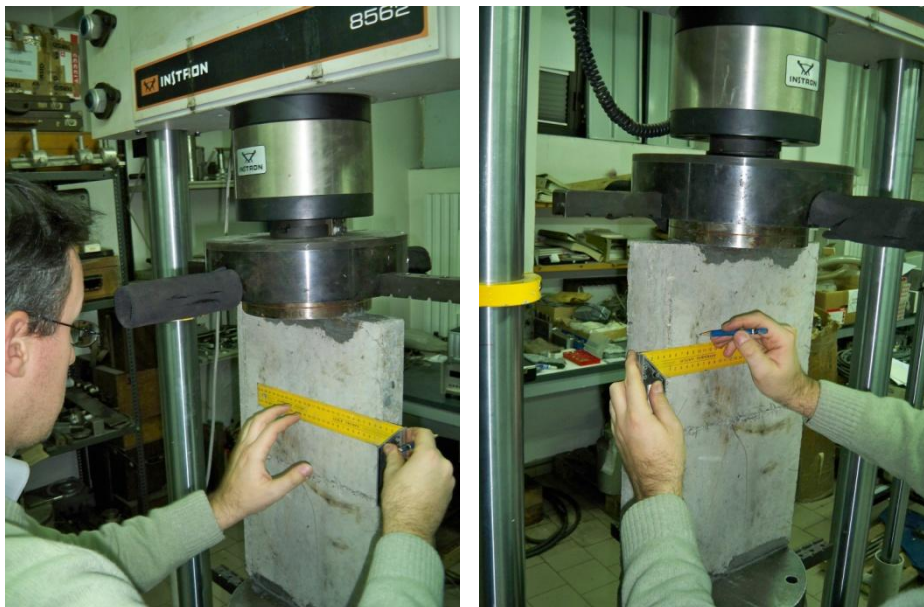


Figure 164 e 165 – Individuazione dei punti di incollaggio delle biffe metalliche attraverso un righello da legno ed una matita

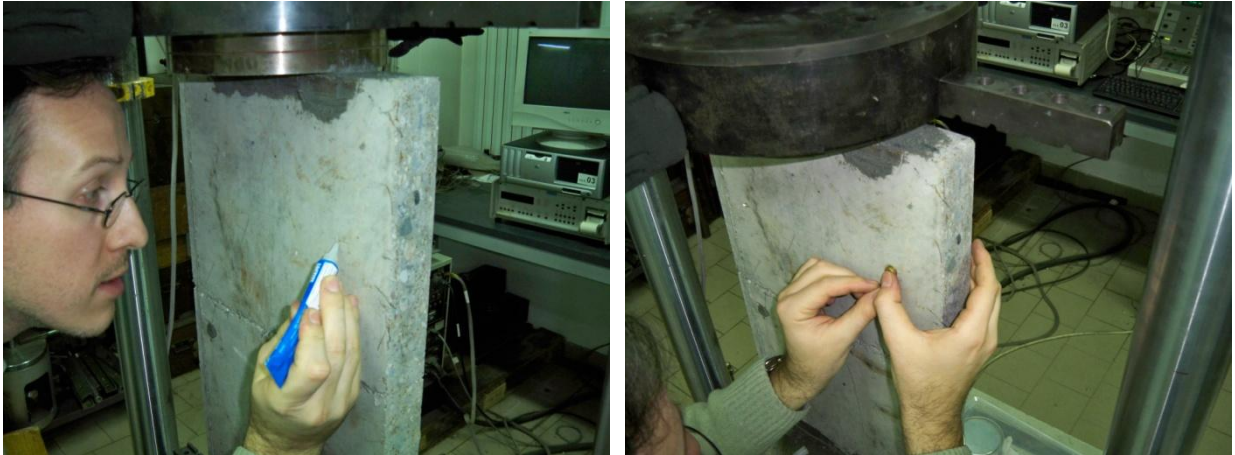


Figure 166 e 167 – Incollaggio delle biffe metalliche con una colla cianoacrilica



Figura 168 – Posizionamento delle seconde biffe della coppia mediante la dima di riferimento in invar (base 250 mm)

L'individuazione dei primi due punti, dove sarebbero poi state incollate le biffe per le misurazioni con il deformometro meccanico digitale, è avvenuta semplicemente grazie all'uso di un righello da legno ed una matita. In questa maniera è stata individuata una linea retta a circa 12,5 cm di distanza dalla fessura e parallela ad essa. I punti sono stati fissati su di essa cercando di stare il più lontano possibile l'uno dall'altra, ovvero il più vicino possibile agli spigoli dei due blocchi.

A questo punto si sono potute incollare le prime due biffe sul blocco con una colla cianoacrilica. Attesi alcuni minuti perché la colla asciugasse, successivamente sono state collocate le rimanenti biffe sempre grazie all'utilizzo di una dima in invar presente nella valigetta del deformometro.

Questo garantisce la certezza che i due elementi si trovassero esattamente a 250 mm l'uno dall'altro (la misura è intesa come distanza tra i centri delle due biffe).

Al termine di queste operazioni si è proceduto con la taratura dello strumento. Grazie all'apposita ditta in invar in dotazione è stato fissato lo zero del comparatore. Subito dopo sono state eseguite per la prima volta le due letture con la macchina *Instron 8562* ancora ferma ed è stato constatato che effettivamente lo strumento riportava un dato molto preciso (oscillava tra 0.000 mm e +0.001 mm, ovvero 1 micron). Già in questo momento è divenuto chiaro che per ottenere una precisione maggiore dallo strumento occorre imprimere una forza leggermente maggiore al tastatore vicino al *display*, dove si trova la maggior parte del peso dello strumento. Per ogni misura si faceva una doppia lettura ribaltando lo strumento. Questo procedimento fornisce un dato che ha già incorporato una prima verifica e contribuisce a limitare sia gli errori piccoli (molto piccoli in realtà) che quelli grossolani. Utilizzare lo strumento non richiede nessuna abilità specifica, eccezion fatta per quei piccoli accorgimenti appena citati.



Figura 169 – Le quattro biffe incollate sui due blocchi di calcestruzzo

A questo punto si poteva cominciare con gli spostamenti indotti attraverso la pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron 8562*. Per la sequenza di spostamenti che è stata stabilita stabilito si rimanda al primo paragrafo di questo capitolo dove si parla in maniera dettagliata anche di questo argomento.

4.3.1_La fase di acquisizione dei dati

Prima di procedere con gli spostamenti della pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron* 8562, è stata redatta una tabella che avesse la funzione di ospitare i dati delle letture che si sarebbero eseguite per ogni spostamento. La tabella aveva tre colonne e venti righe, dato che sarebbero state eseguite diciannove letture in aggiunta a quella iniziale sullo zero. La prima colonna rappresenta gli spostamenti imposti dalla pressa ai blocchi di calcestruzzo; la seconda colonna ospita le letture eseguite sulla prima coppia di biffe (quelle sulla destra guardando i blocchi); nell'ultima colonna sono inseriti i dati relativi alle letture della seconda coppia (quella sulla sinistra).

Gli spostamenti venivano inseriti sull'interfaccia digitale in micron (uno spostamento di 0.01 mm era uguale a 10 μm ; un altro spostamento di 0.1 mm era uguale a 100 μm) e si aggiungevano in successione ai precedenti (per arrivare ad uno spostamento di 2 mm partendo dallo spostamento immediatamente precedente di 1.08 mm occorreva digitare la differenza, ovvero 0.92 mm, che equivalgono a 920 μm , dato da digitare sull'interfaccia).



Figura 170 – L'interfaccia digitale della pressa elettromeccanica servocontrollata Instron 8562

Per raggiungere la massima attendibilità possibile dei dati è preferibile che le letture vengano eseguite dallo stesso operatore. Per ogni spostamento si eseguiva una doppia lettura, dritta ed inversa, su ognuna delle due coppie di punti di riferimento che sono stati citati poco sopra. Di queste due letture (che in linea teorica dovrebbero coincidere) veniva fornita direttamente una media. I dati letti sul *display* comunque differivano tra loro anche di 20/30 micron. Spostamento dopo spostamento, sono stati riportati i seguenti dati:

	<i>Spostamenti Instron (mm)</i>	<i>Lettura A (mm)</i>	<i>Lettura B (mm)</i>
1	0,00	0,001	0,001
2	0,01	0,012	0,017
3	0,02	0,023	0,020
4	0,04	0,039	0,036
5	0,06	0,062	0,062
6	0,08	0,079	0,081
7	0,1	0,104	0,106
8	0,2	0,197	0,22
9	0,5	0,515	0,515
10	1	1,026	1,035
11	1,02	1,044	1,045
12	1,04	1,046	1,045
13	1,06	1,07	1,065
14	1,08	1,085	1,091
15	2	2,036	2,003
16	3	3,016	3,025
17	4	4,063	3,964
18	5	5,079	5,078
19	7	7,107	7,088
20	10	10,159	10,18

Tabella 13 – I dati delle letture degli spostamenti eseguite con il deformometro meccanico Huggenberger EDU II

Terminata la successione degli spostamenti con le letture per lo spostamento di 10 mm, sono iniziati gli spostamenti in verso opposto fino a riportare la pressa alla situazione iniziale (+ 0.00 mm). Le ultime letture fatte con il deformometro con spostamento nuovamente uguale a zero hanno dato ancora lo stesso dato iniziale (+ 0.001 mm). Questa riprova consente di dare comunque una certa attendibilità ai dati che sono stati riportati, anche se si sono presentati degli errori di ripetibilità delle misure.



Figure 171 e 172 – Esecuzione delle letture dritta e inversa con il deformometro meccanico digitale (letture B)

4.3.2 Interpretazione dei dati e conclusioni

L'interpretazione dei dati che sono stati acquisiti durante il corso della prova in laboratorio non è immediata e merita l'elaborazione di diversi ragionamenti. Di ogni lettura si sono ottenuti dei dati che arrivano fino al millesimo di millimetro. Ovviamente la fascia di valori che rappresenta il punto di maggiore interesse è quella che arriva fino allo spostamento pari a 2 mm, oltre al quale non si hanno più dati dagli strumenti elettrici, ossia non si hanno più valori certi. Ad ogni modo si può ragionare sulla base dei valori di quindici diversi spostamenti e perciò si è legittimati a trarre delle conclusioni di qualche tipo.

Da una prima analisi dei dati che vengono messi a confronto con i valori degli spostamenti misurati con i trasduttori induttivi (nella prossima tabella), però, si può consigliare di prestare poca attenzione all'ultimo decimale della cifra, perché le differenze che si possono notare con i valori ricavati dagli strumenti elettrici sono mediamente di circa $0.01 \div 0.02$ mm e per questo non sembra esserci motivo per prendere in considerazione un ulteriore decimale che, con tutta evidenza, sarà quasi sempre sbagliato. La sensazione nell'effettuare misurazioni con questo strumento è stata stranamente quella di non poter contare su una buona ripetibilità delle letture: eseguendo più volte una stessa misura si potevano ottenere valori con anche $20/30 \mu\text{m}$ di differenza. Bisognerà riuscire a stabilire in qualche modo se queste considerazioni sono valide per tutti i deformometri meccanici o solamente per il modello utilizzato in questa prova (*Huggenberger EDU II* base 250 mm). Una analisi più rigorosa dei risultati di questo strumento sarà l'oggetto dell'ultimo capitolo di questa tesi. La tabella che si riporta di seguito presenta comunque degli spunti interessanti.

Essa contiene cinque colonne, nelle quali si inseriscono:

- I valori degli spostamenti imposti attraverso la pressa *Instron* 8562 (mm);
- I dati della lettura con il comparatore meccanico digitale effettuata sulla coppia di bifte di destra "A" (mm);
- I dati della lettura con il comparatore meccanico digitale effettuata sulla coppia di bifte di sinistra "B" (mm);
- La media aritmetica dei due dati precedenti (mm);
- I valori ricavati dai trasduttori induttivi, ovviamente fino al 15° spostamento (mm).

	Spostamenti INSTRON (mm)	Lettura A (mm)	Lettura B (mm)	Media Letture A e B	Valori Trasduttori (mm)
1	0,00	0.001	0.001	0,001	0,000
2	0,01	0.012	0.017	0,015	0,006
3	0,02	0.023	0.02	0,022	0,014
4	0,04	0.039	0.036	0,038	0,031
5	0,06	0.062	0.062	0,062	0,051
6	0,08	0.079	0.081	0,080	0,071
7	0,1	0.104	0.106	0,105	0,089
8	0,2	0.197	0.22	0,212	0,193
9	0,5	0.515	0.515	0,515	0,495
10	1	1.026	1.035	1,031	1,007
11	1,02	1.044	1.045	1,045	1,027
12	1,04	1.046	1.045	1,046	1,047
13	1,06	1.07	1.065	1,068	1,067
14	1,08	1.085	1.091	1,088	1,088
15	2	2.036	2.003	2,020	2,033
16	3	3.016	3.025	3,021	-
17	4	4.063	3.964	4,014	-
18	5	5.079	5.078	5,079	-
19	7	7.107	7.088	7,098	-
20	10	10.159	10.18	10,170	-

Tabella 14 – I dati medi delle letture degli spostamenti eseguite con il comparatore meccanico digitale messi a confronto con i dati ricavati dai trasduttori induttivi e con i valori immessi sulla pressa *Instron* 8562

4.3.3_Verifica aggiuntiva del deformometro utilizzato nella prova

In seguito al confronto dei valori ottenuti con i diversi strumenti di misurazione durante la prova in laboratorio (ed anche durante quella sulla torre campanaria di S. Vittore di Arcisate; cap. 5), si è aperta una discussione circa l'attendibilità dei valori ottenuti con il deformometro utilizzato in quella occasione: il deformometro meccanico digitale *Huggenberger EDU II* a base 250 mm. Già durante lo svolgimento delle misure si è notato come eseguendo più volte una stessa lettura il dato ottenuto variava in maniera sospetta. Ripetendo la stessa lettura a distanza di poco tempo, il medesimo operatore si trovava di fronte a valori che differivano tra loro anche di 40/50 μm . Queste differenze non erano attese in quanto questo strumento è molto recente, e dovrebbe rappresentare di fatto lo sviluppo dell'altro deformometro a base 250 mm, il modello *Huggenberger EDU*, con il quale verrà confrontato nel corso di questa verifica aggiuntiva.

Tutto sommato i valori ottenuti, sia in laboratorio che ad Arcisate, riescono comunque a rispecchiare (anche se grossolanamente) l'andamento dei movimenti delle fessure, ma occorre eliminare ogni dubbio circa l'accuratezza delle sue misure, anche in luce del fatto che questa verifica è sostanzialmente l'obiettivo principale di questa tesi.

E' stato necessario pertanto organizzare un'ulteriore prova in laboratorio che avesse come scopo proprio la definizione dell'accuratezza di questo deformometro.

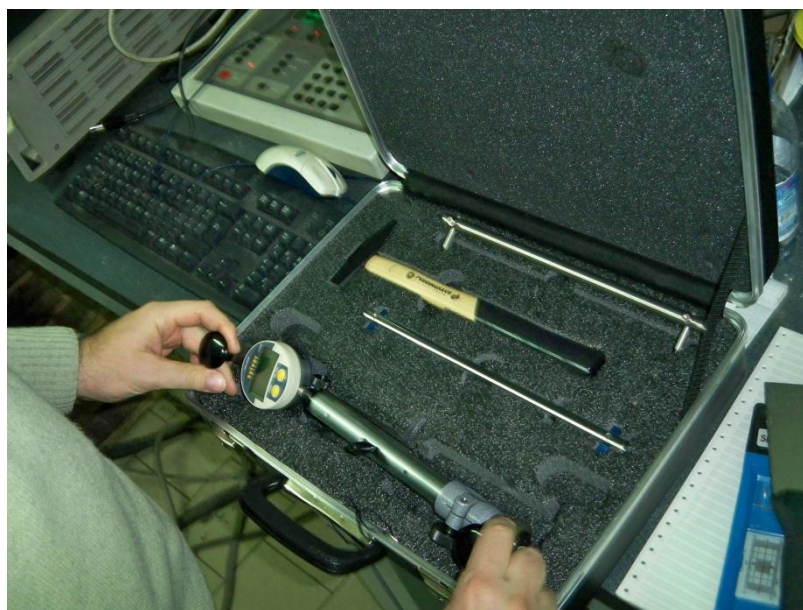


Figura 173 – Il deformometro *Huggenberger EDU II* a base 250 mm e gli strumenti in dotazione nella sua valigetta

La prova è stata svolta in laboratorio nel dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano in data 19/04/2010. Su di un banco di taratura, che consente di applicare degli spostamenti verificabili attraverso un'interfaccia digitale, sono state incollate delle basette in ottone che presentano dei fori che "attendono" le punte del deformometro ad una distanza di 250 mm l'una dall'altra. Anche in questa occasione il loro posizionamento è stato effettuato con l'ausilio di una dima in acciaio invar predisposta a questo compito.



Figura 174 – Il banco di taratura (in basso a destra) e la sua interfaccia dove leggere gli spostamenti

Sono state incollate due coppie di basette: una su un piano orizzontale e l'altra su un piano verticale. Una delle sensazioni durante l'utilizzo dello strumento infatti era stata proprio quella che, misurando le distanze su un piano verticale, le oscillazioni delle misure fossero mediamente maggiori.



Figura 175 – Posizionamento delle due basette su piano verticale attraverso una dima in acciaio invar (base 250 mm)

A questo punto bisognava procedere con la taratura degli strumenti. In un primo momento è sembrata critica anche questa operazione: dopo aver posto il deformometro *Huggenberger EDU II* sulla dima è stato azzerato lo strumento. Togliendo e riposizionando nuovamente lo strumento dopo pochi istanti si leggeva però sempre un dato diverso di circa $20 \mu\text{m}$ (sempre in crescita). Con il passare dei minuti (una decina) ed eseguendo più volte l'azzeramento dello strumento si è giunti ad una buona ripetibilità dello zero sulla sua dima.

Sono iniziate così le letture sulle basette incollate sul banco di taratura anch'esso posto sullo zero di partenza.



Figura 176 – Prime letture sul deformometro Huggenberger EDU II

Inizialmente si è provato ad eseguire una lettura sulle basette del piano orizzontale ancora prima di applicare degli spostamenti al banco. Da subito è sembrata palese una scarsa ripetibilità delle letture: i valori ottenuti con lo strumento dritto o rovesciato differivano di circa $30 \mu\text{m}$ ($\pm 15 \mu\text{m}$) tra di loro.

Allora è stato pensato di eseguire preventivamente un'altra verifica: posizionato lo strumento sulle basette del piano orizzontale, questo sarebbe stato tenuto fermo (ovvero non sarebbe stato tolto e riposizionato per ogni lettura) mentre venivano applicati degli spostamenti casuali attraverso una rotella del banco di prova che genera degli spostamenti. Rapidamente sono state svolte una ventina di letture (in crescita ed in discesa) ed i valori ottenuti questa volta sono stati davvero precisi: la differenza tra il valore del deformometro *Huggenberger EDU II* e quello dell'interfaccia del banco di taratura era di circa $1-2 \mu\text{m}$. La stessa procedura è stata eseguita anche per quanto riguarda le basette incollate sul piano verticale e i risultati sono stati molto simili (differenze al massimo di $3 \mu\text{m}$).

Già questi primi risultati fanno pensare che il problema non stia nello scorrimento delle aste né nella precisione del comparatore che esegue la misura, ma che debba essere ricercato nel sistema di connessione punta-basetta.

Si è proceduto con la parte più interessante della prova. Utilizzando come riferimento per la lettura le sole basette sul piano verticale (situazione più critica) sono state ripetute in serie tante misurazioni, dritte e rovesciate, con i due deformometri a base 250 mm. Per aumentare il grado di attendibilità della verifica che si andava ad eseguire le misure sono state fatte da tre operatori diversi, con gradi diversi di esperienza.

Nella prossima pagina viene riportata una tabella che contiene:

- Valore costante del banco di taratura (mm);
- Valore delle letture eseguite con il deformometro *Huggenberger EDU* (mm) (in grassetto le letture “dritte”);
- Valore delle letture eseguite con il deformometro *Huggenberger EDU II* (mm) (in grassetto le letture “dritte”);
- Operatore che sta eseguendo la lettura (A, B o C)



Figura 177 e 178 – A sinistra l’operatore A mentre esegue una lettura sul deformometro Huggenberger EDU. A destra l’operatore B mentre esegue una lettura sul deformometro Huggenberger EDU II



Figura 179 – L’operatore C mentre esegue una lettura sul deformometro Huggenberger EDU II

Banco di taratura	<i>Huggenberger EDU</i>	<i>Huggenberger EDU II</i>	Operatore
0,001	0,003	0,068	A
0,001	0,003	0,091	A
0,001	0,005	0,055	A
0,001	0,003	0,091	A
0,001	0,004	0,042	A
0,001	0,000	0,100	A
0,001	0,002	0,072	A
0,001	0,002	0,062	A
0,001	-	0,090	A
0,001	-	0,072	A
0,001	0,002	0,052	B
0,001	0,001	0,067	B
0,001	0,006	0,085	B
0,001	0,000	0,099	B
0,001	-	0,041	B
0,001	-	0,059	B
0,001	0,003	0,033	C
0,001	0,001	0,028	C
0,001	-	0,031	C
0,001	-	0,036	C
0,001	-	0,009	C
0,001	-	0,036	C

Tabella 15 – I valori delle letture effettuate dai tre operatori sui diversi deformometri meccanici con il banco di taratura fermo. In grassetto le letture effettuate con lo strumento dritto; gli altri valori sono di misure eseguite con lo strumento ribaltato

I risultati ottenuti con i due strumenti sono molto diversi tra loro. In primo luogo tutti i valori del secondo deformometro (*EDU II*) sono stranamente lontani dallo zero, anche se è stato effettuato l'azzeramento per entrambi gli strumenti nella stessa maniera. Anche ponendo di aver azzerato in maniera scorretta il secondo deformometro, si palesano comunque grossi problemi sulla ripetibilità delle sue misurazioni.

Proprio per indagare la sola ripetibilità delle misure lette, si ponga come zero di partenza la prima lettura eseguita con ognuno dei due strumenti (rispettivamente 0,003 e 0,068 mm).

	Huggenberger EDU (mm)	Huggenberger EDU II (mm)
GENERALE zero di partenza	0,003	0,068
GENERALE Errore medio	0,0015	0,0232
GENERALE Errore max	0,003	0,059
OP. A zero di partenza	0,003	0,068
OP. E A errore medio	0,001	0,017
OP. A errore max	0,003	0,032
OP. B zero di partenza	0,002	0,052
OP. B errore medio	0,002	0,023
OP. B errore max	0,004	0,047
OP. C zero di partenza	0,003	0,033
OP. C errore medio	0,002	0,007
OP. C errore max	0,002	0,024

Tabella 16 – Analisi dei valori delle letture effettuate dai tre operatori sui diversi deformometri meccanici con il banco di taratura fermo

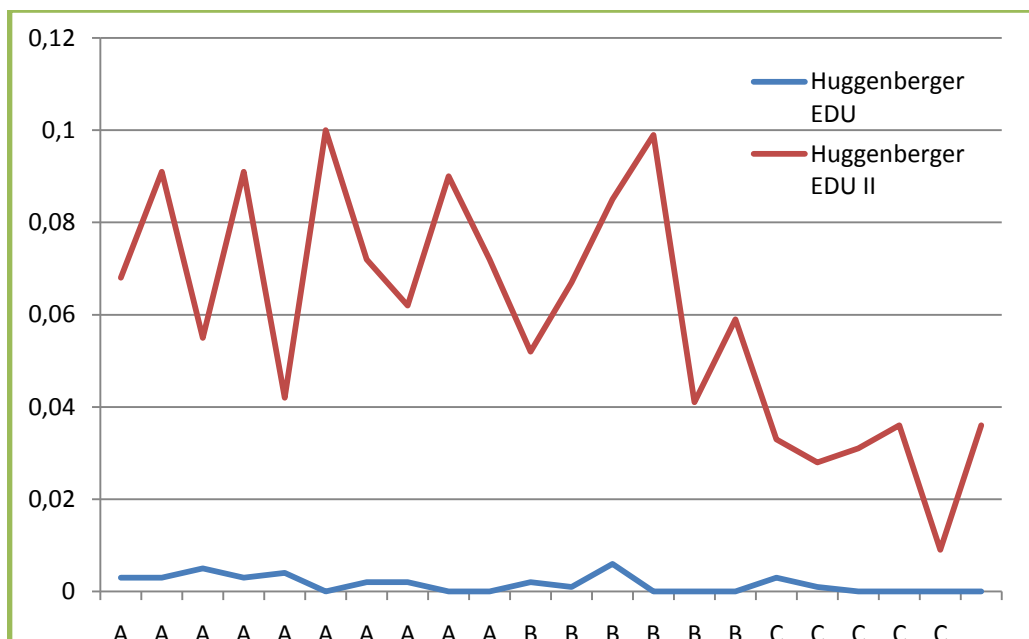


Figura 180 – Grafico dei valori letti con i due deformometri meccanici messi a confronto

I risultati riassunti nella tabella della pagina precedente evidenziano un comportamento anomalo del deformometro *Huggenberger EDU II*, come si sospettava. Ovviamente tutto ciò stupisce dal momento che, come già detto, è il modello successivo dello stesso strumento con il quale viene confrontato in questo paragrafo. Gli errori che derivano dalle letture con questo strumento, per quanto piccoli, appaiono enormi se paragonati a quelli che si commettono con l'altro. Nella tabella si è voluto evidenziare anche i valori delle letture dei singoli operatori, ma quelli che hanno maggiore interesse sono i primi che vengono presentati.

Con il deformometro *Huggenberger EDU II* si commettono mediamente degli errori di ripetibilità di $\pm 0,023$ mm ($23 \mu\text{m}$). Questo dato è piuttosto allarmante e dovrà essere riconsiderato anche nelle conclusioni sulla prossima prova (ad Arcisate sulla torre campanaria).

Si ripete in questo momento come la sensazione è che l'errore derivi da imperfezioni del contatto tra sfera della punta e foro della basetta. (anche l'altro deformometro ha le punte che terminano a sfera). Nella prova le basette utilizzate sono state le medesime per i due strumenti.

Anche dopo la fine di questa prova rimane ancora da capire se il problema che si è verificato sia un difetto del singolo deformometro o di tutti i modelli di quella serie.

4.4_Misure con i fessurimetri piani

Si procede nella trattazione dei diversi metodi, dei quali si è voluto verificare l'accuratezza nel corso della prova svolta in laboratorio al dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano in data 05/02/2010, parlando dei fessurimetri piani (o righelli graduati). Questi strumenti funzionano in maniera molto semplice e si rimanda la loro specifica descrizione al capitolo 2, dove si parla di questo ed anche delle altre tipologie di righelli graduati. In generale sono strumenti economici, versatili e di comodo utilizzo. A fronte di questi vantaggi si sa, già prima di questa prova, che l'accuratezza che garantiscono non è particolarmente fine.

Lo strumento è formato da due componenti che si fissano a cavallo della fessura. Quello più prossimo alla fessura ha un fondo bianco ed ha inciso un retino 4x2 cm che ha un passo di un millimetro. Sull'altro, che invece è trasparente, c'è incisa invece una croce rossa che, scorrendo, indica lo spostamento relativo tra le due parti.

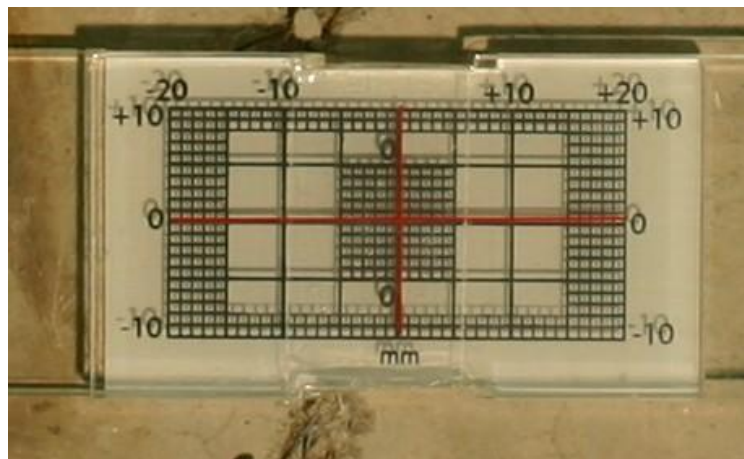


Figura 181 – Un fessurimetro piano posizionato sullo zero

La lettura dello strumento è immediata e si svolge semplicemente attraverso la vista dell'operatore che deve riportare il dato che vede sulla griglia cercando di dare significato anche al mezzo millimetro, per quanto questo significhi fare un'approssimazione.

Il fessurimetro piano è piuttosto robusto e viene venduto con uno strato di adesivo che mantiene la perfetta adesione dei due componenti anche durante l'applicazione in sito. Una volta incollato (o fissato tramite piastrine) si può procedere alla rimozione di questo adesivo. Il fessurimetro da quel momento inizia a dare informazioni sugli spostamenti.

Per la prova in laboratorio è stato preferito l'incollaggio: il prodotto utilizzato è una resina poliesteri. Questo mastice non ha dei tempi brevissimi di presa ed allora è stato scelto di applicare anche un piccolo quantitativo di colla cianoacrilica. In questa maniera si aveva garantito un perfetto



Figure 182 e 183 – Applicazione della colla a presa rapida e del mastice solido sul fessurimetro piano

incollaggio sia nel breve che nel lungo periodo. Un altro accorgimento è stato quello di abbondare con il mastice in maniera tale che, premendo contro il blocco di calcestruzzo durante il fissaggio, una parte di esso fuoriuscisse attraverso i piccoli fori che presentano i due componenti del fessurimetro per l'eventuale fissaggio con piastrine metalliche. In questa maniera il mastice ha bloccato lo strumento in maniera ottimale, come se fosse un incastro.



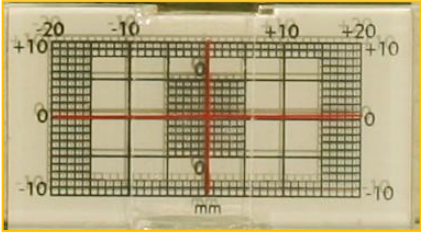
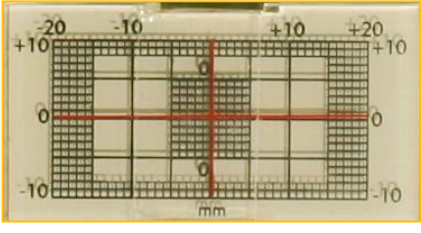
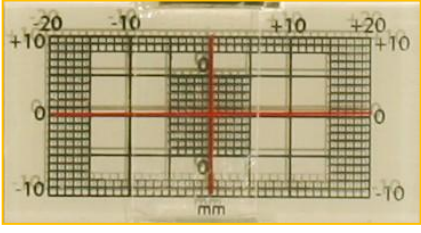
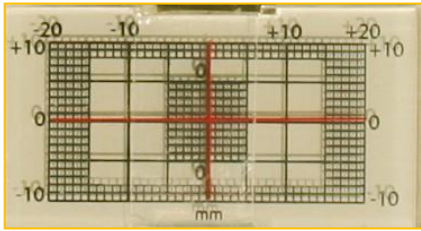
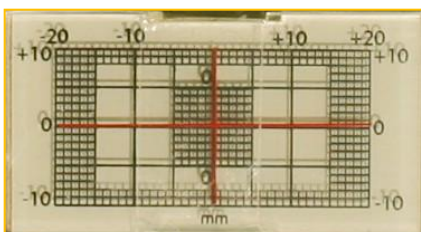
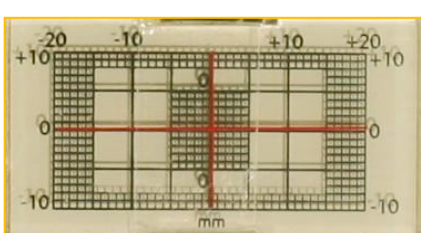
Figura 184 e 185 – Il fissaggio del fessurimetro sui blocchi di calcestruzzo

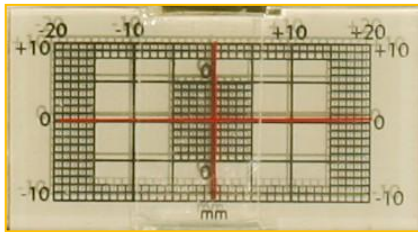
Una volta asciugato il mastice è stato rimosso l'adesivo. Il fessurimetro piano era così pronto all'inizio della prova.

Di seguito si riporta la sequenza delle immagini che descrivono passo per passo quello che un normale osservatore avrebbe potuto vedere ad occhio nudo. Lo spostamento è noto e predeterminato e non è facile accostarsi alla fase di lettura del dato in maniera obiettiva. Conoscendo lo spostamento che si dovrebbe leggere si rischierebbe di essere influenzati e di guardare la croce rossa cercando di leggere una misura che in realtà si ha già in mente. E' per questo che è stato chiesto ad un'altra persona di leggere la misura sul fessurimetro: questa persona ovviamente non conosceva in quel momento gli spostamenti noti della pressa elettromeccanica *Instron* 8562, né i valori ancora più attendibili che sono stati forniti dai trasduttori induttivi (anche se non oltre i 2 mm). In questa maniera dalla lettura è stato ottenuto un valore che si può raffrontare al valore dello spostamento indotto grazie alla pressa ed ai dati "veri" degli strumenti elettrici. Le immagini mostrate all'osservatore (inserite nelle prossime tabelle) sono esattamente della stessa dimensione del fessurimetro reale, ovvero 4x2 cm. Distorcere la percezione dell'osservatore con ingrandimenti avrebbe di certo influito sul dato letto, e di conseguenza sulla verifica dell'accuratezza di questo strumento. Trarre delle conclusioni sull'accuratezza dello strumento è poi lo scopo di questo capitolo e di tutta la prova in laboratorio che in esso viene descritto.

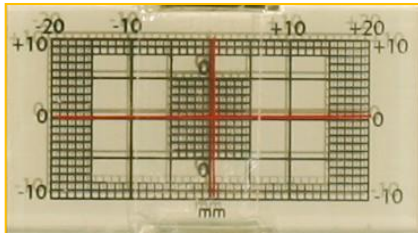
Dalla prossima pagina si riporta una sequenza di immagini accompagnate da una tabella con i seguenti valori:

- Spostamento imposto dalla pressa *Instron* 8562 (mm);
- Valore dello stesso spostamento ricavato dalla media delle due letture con i trasduttori induttivi (non oltre lo spostamento di 2 mm);
- Lettura della misura da parte di un osservatore estraneo all'esecuzione della prova (mm);
- Differenza tra il valore medio dello spostamento ricavato attraverso i trasduttori induttivi e la lettura da parte dell'osservatore. Dopo lo spostamento pari a 2 mm la differenza fa riferimento al dato della pressa *Instron*.

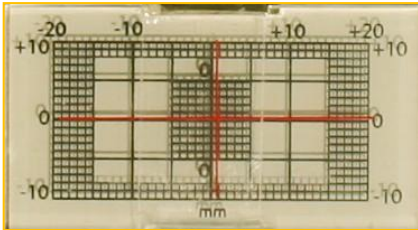
	<i>Spostamenti INSTRON (mm)</i>	<i>Media trasduttori (mm)</i>	<i>Letture osservatore (mm)</i>	<i>Differenza (mm)</i>
	0.00	0.000	0.0	=
	0.01	0.006	0.0	- 0.006
	0.02	0.014	0.0	- 0.014
	0.04	0.031	0.0	- 0.031
	0.06	0.051	0.0	- 0.051
	0.08	0.071	0.0	- 0.071



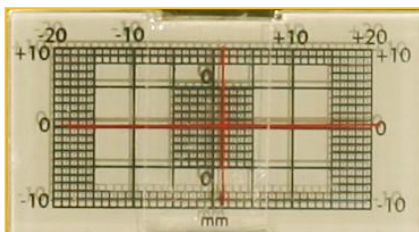
0.1 0.089 0.2 + 0.111



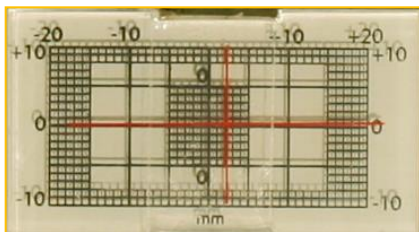
0.2 0.193 0.5 + 0.307



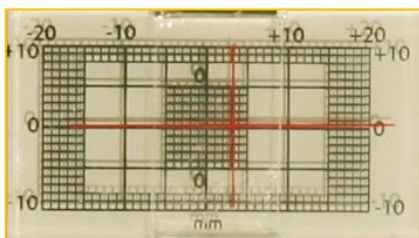
0.5 0.495 1.0 + 0.505



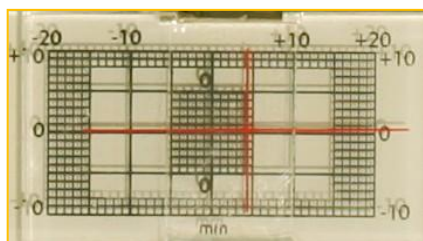
1 1.007 1.2 + 0.193



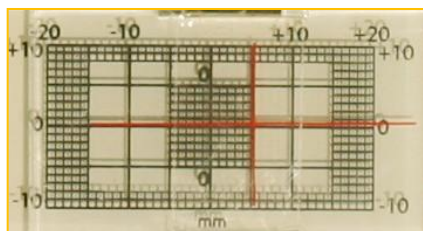
2 2.033 2 - 0.033



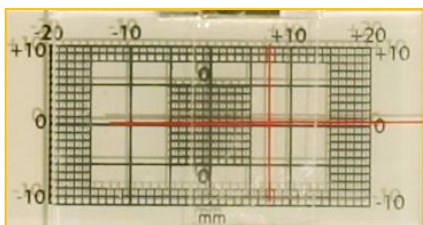
3 x 3 =



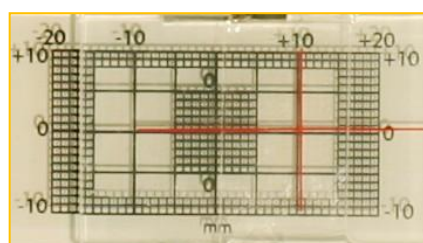
4 x **4.5** **+ 0.5**



5 x **5** **=**



7 x **7.5** **+ 0.5**



10 x **10.5** **+ 0.5**

Tabella 17 – Confronto tra le letture eseguite da un operatore che non ha partecipato alla prova sul fessurimetro piano, i dati noti degli spostamenti applicati attraverso la pressa elettromeccanica Instron 8562 e la media dei valori ricavati attraverso i trasduttori induttivi

4.4.1 Interpretazione dei dati e conclusioni

I fessurimetri piani sono strumenti largamente utilizzati per il monitoraggio delle fessure, sia per la loro economicità che per la loro versatilità. Ad oggi questi righelli, come quelli di cui è stata testata l'accuratezza, vengono venduti con un'accuratezza dichiarata del mezzo millimetro. Ora si vedrà cosa emerge dalla prova in laboratorio. Lo strumento in questione garantisce un'accuratezza molto grossolana, perché fornisce certezza solo sul millimetro, in quanto il mezzo millimetro più di una

volta è risultato difficile da leggere. Il dato letto dall'osservatore (estraneo alla prova) presenta i decimali del millimetro il più delle volte sbagliati rispetto alle volte nelle quali i due valori (reale e letto) coincidono. Se si considerassero invece i dati senza i decimali del millimetro, i valori sarebbero sempre corretti.

Per monitorare una fessura non ci si può accontentare di un'accuratezza di questo tipo. I movimenti di una fessura occorre studiarli in una scala che varia tra centesimo ed il decimo di millimetro nella maggior parte dei casi reali. In altri casi addirittura, come nello studio dell'apertura (o della chiusura) di una fessura esistente dovuta alle escursioni termiche giornaliere, il dato che occorre apprezzare dovrà esprimere gli spostamenti fino al millesimo di millimetro, ovvero i micron). Il fessurimetro piano è pressoché inutilizzabile nella maggior parte dei casi.

Questo strumento comunque può giocare ancora dei ruoli minori nel monitoraggio statico degli spostamenti di una fessura. Infatti si potrebbe utilizzare un fessurimetro piano come punto di riferimento grossolano in quelle situazioni che la nostra esperienza di operatori nel settore ci deve consigliare. Ovvero quando una situazione è poco preoccupante e non sembra necessitare di uno studio con una scansione delle letture frequente, finalizzato a comprendere se i movimenti delle due parti di muratura sono in accelerazione o in decelerazione. Con un fessurimetro applicato si può capire solo, dopo un certo periodo di tempo, se la fessura è in stato di quiete o se è invece in movimento. Per capire la natura del movimento in atto occorre integrare il monitoraggio in corso con i fessurimetri anche con qualche altro strumento che fornisca dati più accurati (trasduttori elettrici, deformometri meccanici, ...). Questa integrazione con altri strumenti è comunque sempre consigliabile.

Un altro tipo di utilizzo di questo strumento che si può prevedere è quello di supporto alle letture con altri metodi. Ad esempio nel caso si decidesse di studiare i movimenti di una fessura con un trasduttore induttivo simile a quelli della prova in laboratorio (sensori *W1ELA/0-2*), ovvero uno strumento con una accuratezza molto fine ma con un fondo scala molto piccolo, applicare contemporaneamente un fessurimetro di questo tipo potrebbe avere una sua utilità. Come è stato appena detto, il trasduttore induttivo in questione presenta un fondo scala molto piccolo (± 2 mm) a fronte di un'accuratezza molto fine. Proprio queste sue caratteristiche potrebbero condurre ad un caso ipotetico in cui un improvviso spostamento (superiore ai 2 mm) portasse il trasduttore fuori dal suo fondo scala, rendendolo di fatto inutilizzabile. Se non si fosse applicato un fessurimetro a fianco (che ha un fondo scala 10 volte maggiore), si sarebbe perduta la possibilità di risalire al movimento complessivo e si creerebbe un imbarazzo, perché gli operatori sarebbero incapaci di quantificare uno spostamento importantissimo, del quale un monitoraggio reale non può in nessuna maniera non conoscere il valore. Con un fessurimetro applicato, invece, si potrebbe sicuramente risalire allo spostamento accaduto, ovviamente con un'accuratezza che non sorpassa il mezzo millimetro, ma si

può facilmente comprendere che, nel caso di eventi di questo tipo, il dato dello spostamento può essere meno accurato, purché sia corretto. Nel caso in cui questo ipotetico grande spostamento rappresentasse un rischio reale (il ché è piuttosto probabile), si dovrebbe velocemente procedere con un intervento di messa in sicurezza dello stabile. Se, viceversa, dopo questo spostamento macroscopico per una fessura (dell'ordine di qualche millimetro) la situazione tendesse a ristabilizzarsi, sarebbe preferibile scegliere di continuare il monitoraggio piuttosto che intervenire in maniera repentina. Per proseguire il monitoraggio con il trasduttore induttivo bisognerà però operare un riposizionamento ed una ricalibrazione dello strumento.

Un ultimo vantaggio di questo strumento, rispetto agli altri finora trattati, potrebbe essere il seguente: per particolari casi poco preoccupanti si potrebbe addirittura pensare di posizionare su una fessura un righello piano e fare eseguire direttamente dall'abitante dello stabile le letture dello strumento o, altrimenti, fargli scattare delle fotografie che può inviare successivamente al tecnico per la lettura. In tal caso a fianco di una piccolissima spesa per lo strumento, non si ha bisogno neanche di sopralluoghi, almeno fino a che si continua a considerare poco pericolosa la situazione in analisi.

Rispetto agli strumenti elettrici, poi, questo fessurimetro non ha bisogno di alcun sistema di acquisizione dei dati, né di nessuna alimentazione, né tantomeno di nessuna conversione dei dati.

Questo strumento perciò, anche se è poco preciso, presenta comunque alcune caratteristiche vantaggiose. Si vuole però segnalare, già in coda a questo paragrafo, che il fessurimetro moiré, oggetto del paragrafo che segue, conserva quasi tutti i vantaggi elencati (economicità, versatilità, indipendenza dalla rete elettrica, ...) a fronte di un'accuratezza molto maggiore, il ché rappresenta una differenza immensa. E' vero però che questo altro fessurimetro avrà bisogno di un programma che elabora informaticamente i fotogrammi per arrivare al dato dello spostamento relativo, ma questo è un giusto onere di cui farsi carico, se si considera insieme a questo il fortissimo incremento dal punto di vista dell'accuratezza. Si rimanda al prossimo paragrafo considerazioni più approfondite su questo argomento.

4.5_Misure con i fessurimetri moiré

Il quarto metodo di misurazione degli spostamenti relativi su una fessura esistente che viene trattato in questo capitolo, tra tutti quelli presi in considerazione nella prova eseguita in laboratorio al dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano in data 05/02/2010, utilizza come strumento i fessurimetri moiré. Questo metodo, insieme con il prossimo (l'analisi di immagini), rappresenta la componente più innovativa di questa tesi, quella di maggiore interesse. Per il funzionamento tecnico dello strumento si rimanda al capitolo 3, nel quale si parla in maniera specifica proprio di questo. In poche parole, comunque, il fessurimetro moiré sfrutta il particolare effetto che viene creato dalla sovrapposizione di due retini con griglie di cerchi concentrici. Le due griglie hanno un passo leggermente diverso, in quanto una è leggermente più piccola dell'altra a fronte dello stesso numero di cerchi neri e bianchi. I due retini sono incisi su due diversi componenti che vengono incollati sulle porzioni di muratura divise dalla fessura della quale interessa conoscere il movimento, nella stessa maniera che è stata osservata anche per i fessurimetri piani. Ogni piccolo spostamento non viene individuato in maniera diretta da una griglia di riferimento (come invece avveniva per i fessurimetri piani). In questo caso lo spostamento viene evidenziato dalla particolare capacità di queste due griglie di cerchi concentrici di assumere disegni tipici (frange di interferenza), che vanno analizzati in una seconda fase per riuscire ad ottenere un dato metrico dello spostamento avvenuto. La concezione di questo metodo è più elaborata, ma garantisce un grado di accuratezza maggiore che giustifica i passaggi in più che si devono affrontare.



Figure 186 e 187 – Un fessurimetro moiré durante l'incollaggio delle due diverse componenti

Per comprendere i passaggi che occorre svolgere per una corretta analisi delle frange si rimanda ancora al capitolo 3, nel quale tutto quel discorso viene affrontato in maniera adeguata. Le trasformazioni che intervengono utilizzano, tra gli altri, il passaggio dalle coordinate cartesiane alle coordinate polari ed anche la tecnica della trasformata di *Fourier*.

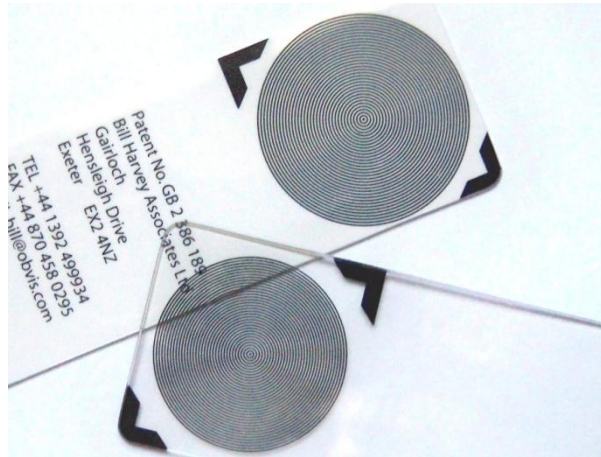


Figura 188 – Un fessurimetro moiré

Lo strumento è formato da due componenti differenti, delle quali quello più prossimo alla fessura da misurare è bianco, mentre l'altro componente è trasparente, caratteristica irrinunciabile dato che tutto si basa sulla possibilità di leggere i retini sovrapposti l'uno all'altro. Questi fessurimetri sono strutturati analogamente a quelli piani trattati nel paragrafo precedente (4.4), ovvero i fessurimetri piani. Le differenze con i precedenti strumenti, dal punto di vista delle caratteristiche fisiche dell'oggetto, sono attualmente a sfavore del fessurimetro moiré, il quale presenta uno spessore molto piccolo (circa 1 mm) che ne facilita l'imbarcamento, non presenta alcun espediente che cerchi di risolvere la questione della complanarità dei due componenti e, infine, i due stessi componenti sono venduti separati e non solidali.

Uno degli obiettivi di questo lavoro sarà quello di cercare di ottimizzare l'utilizzo dello strumento e perfezionarne le caratteristiche. Già da subito si può però asserire che, con tutta evidenza, per le due ultime questioni si potrebbero copiare gli espedienti che sono ormai consolidati per i fessurimetri piani (tipo Salmoiraghi): dotare il componente trasparente (quello che va a sovrapporsi all'altro) di uno spessore nella porzione che si deve incollare, in maniera tale da evitare di fare spessore con la colla (o in altri modi) per rendere complanari i due retini; in aggiunta a questo si possono rendere solidali le due componenti con un piccolo strato di adesivo da strappare una volta che ha fatto presa la colla. I fessurimetri moiré sono stati acquistati per la prova direttamente dall'Inghilterra (uno costa 12 sterline; 10 costano 100 sterline). Sono arrivati al Dipartimento di Ingegneria Strutturale già con un piccolo difetto purtroppo: un leggero imbarcamento.

In questa fase il discorso è incentrato sulle prime fasi della prova in laboratorio, appena prima dell'applicazione dei fessurimetri moiré sui due blocchi di calcestruzzo, ormai incollati alle piastre removibili in acciaio della pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron* 8562.

E' stato stabilito che si sarebbero incollati due strumenti, dei quali uno sulla faccia "anteriore" (ovvero quella della quale si sarebbero presi due fotogrammi con una macchina fotografica fissa su un cavalletto) messo ortogonalmente all'andamento della fessura, ed un altro sulla faccia che si definisce invece "posteriore", messo volutamente ad un angolo di circa 30°. Come collante è stato utilizzato anche in questo caso un mastice solido per marmi.

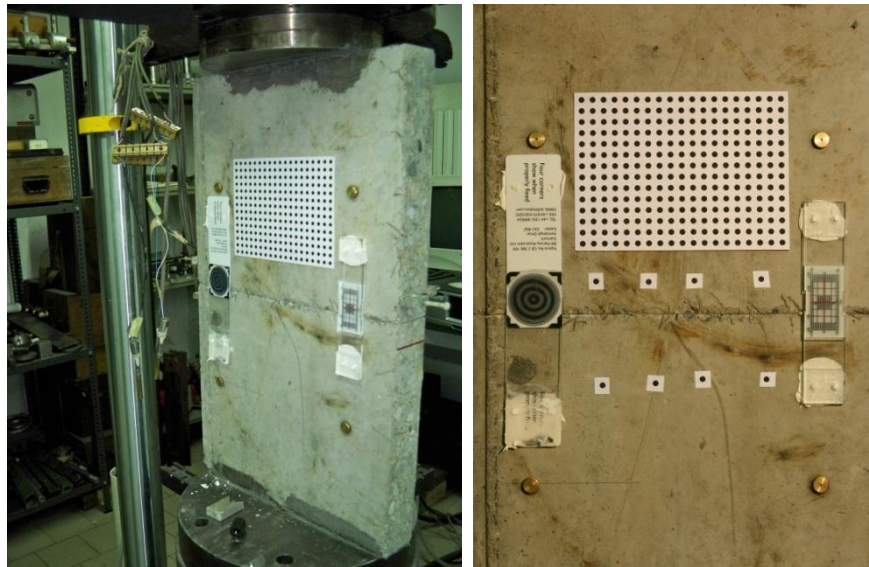


Figure 189 e 190 – Il fessurimetro moiré applicato sulla faccia "anteriore" (insieme con gli altri strumenti)

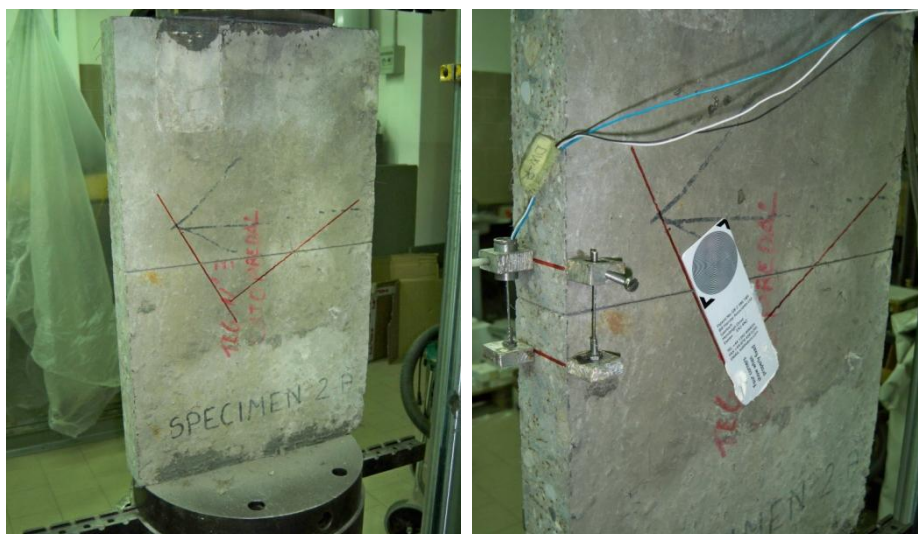


Figure 191 e 192 – Il fessurimetro moiré applicato sulla faccia "posteriore" ad un angolo di circa 30°

L'incollaggio dei fessurimetri moiré ha richiesto un certo impegno. Era difficilissimo che i due componenti aderissero in maniera perfetta nella loro porzione da sovrapporre, ovvero la porzione con i retini fatti di griglie di cerchi concentrici. Questo è accaduto sia per l'imbarcamento che presentavano entrambi i componenti (troppo esili evidentemente), sia per la mancanza di uno spessore per il componente trasparente che lo portasse in maniera precisa in aderenza al piano dell'altro. Al termine di questa procedura non si era affatto soddisfatti del risultato ottenuto: nonostante si fosse abbondato con il mastice sul componente trasparente, per fare sì che fungesse anche da spessore, l'aderenza non era perfetta. Il problema doveva essere risolto, perché la non perfetta aderenza dei due retini influenza il disegno di interferenza che le griglie di cerchi concentrici formano, fatto che avrebbe reso inutile la prova. Era proprio evidente, poi, come l'effetto dato dalle griglie mutasse a seconda del punto da dove veniva osservato il fessurimetro. Anche questo aspetto rappresentava un problema dal momento che si voleva verificare se è possibile utilizzare questi strumenti anche se i punti di presa fotografica non sono esattamente in asse con gli strumenti (cosa che capita molto spesso nei casi delle fessure reali). L'idea che ha risolto in maniera perfetta questi problemi consisteva nell'utilizzare della vaselina tra i due componenti. In questa maniera l'aderenza sarebbe stata ottima e non ci sarebbe stata alcuna influenza sulla libertà di movimento dell'uno rispetto all'altro.

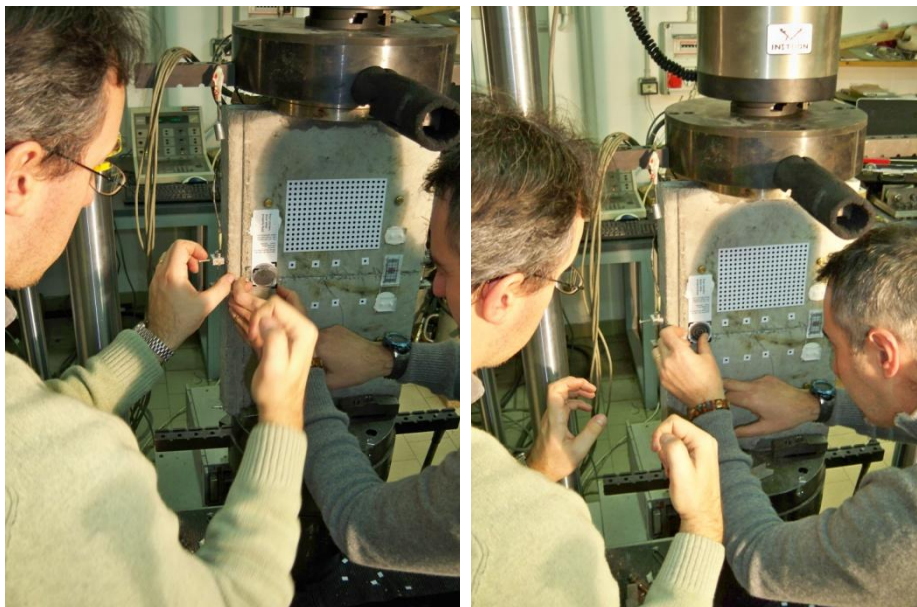


Figure 193 e 194 – Applicazione della vaselina tra i due componenti per perfezionare l'aderenza

Un ultimo accorgimento riguarda il posizionamento dei due componenti del fessurimetro moiré. Per quanto piccolo possa essere, l'oggetto ha un suo spessore, e i due retini non sarebbero posti sullo stesso piano se quello del componente superiore (quello trasparente) non venisse inciso sulla

faccia posteriore a diretto contatto con il suo analogo del componente bianco. Sui due componenti sono presenti due segni ad “L” su due angoli opposti che, se i componenti sono posizionati correttamente, vanno a finire ognuno su un diverso angolo. Se invece il componente trasparente è ribaltato (con il retino sulla faccia anteriore) si vedono solamente due coppie di segni sovrapposti. Questo espediente è davvero indispensabile.

4.5.1_La fase di acquisizione dei fotogrammi

Sono stati posizionati nella maniera corretta i due fessurimetri moiré dei quali si voleva verificare l'accuratezza nel misurare gli spostamenti. La vaselina ha risolto l'ultimo problema e l'aderenza tra i due retini con griglie di cerchi concentrici era ottimale. L'unica imperfezione stava nel fatto che proprio la vaselina offuscava leggermente la lettura del secondo retino, quello sul componente bianco. Con buona probabilità questo problema potrà essere risolto in altre occasioni con la glicerina al posto della vaselina, che è in grado di garantire la stessa perfezione nell'aderenza ed al tempo stesso è completamente trasparente.



Figura 195 – La macchina fotografica, modello Canon EOS 300D DIGITAL, fissata sul cavalletto ed il riflettore ancora spento



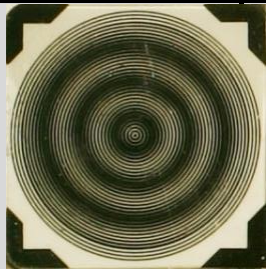
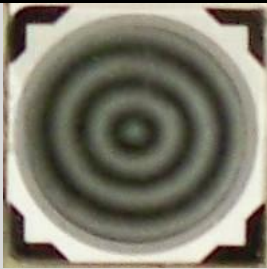

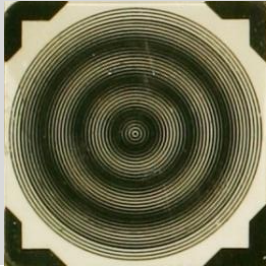


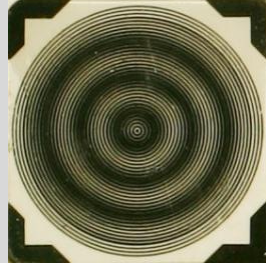
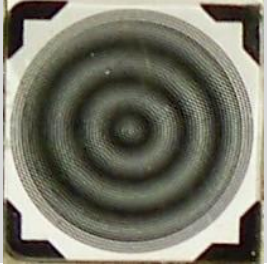
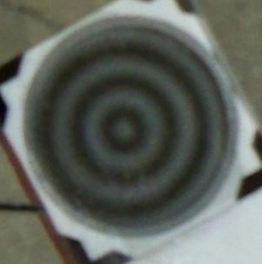
Figura 196 – La macchina fotografica digitale, modello Kodak V1273, utilizzata per le fotografie da posizione variabile

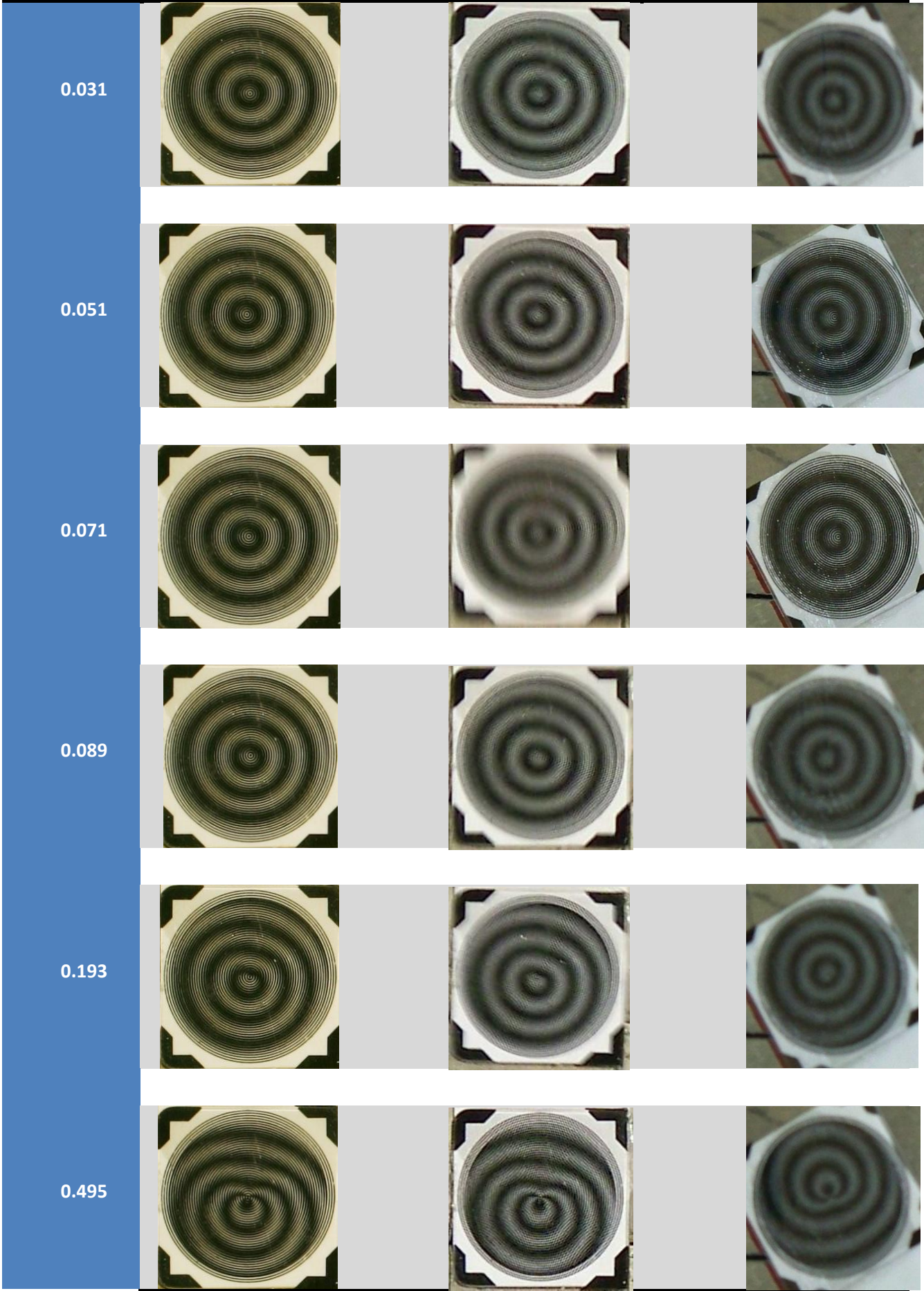
Con questo metodo non si acquisiscono direttamente le misure degli spostamenti, ma si ricavano indirettamente dai fotogrammi acquisiti ed elaborati nel modo che è stato descritto nel paragrafo 3.1. In questa fase dunque occorre scattare delle fotografie. Certo sarebbe stato fatto in maniera ragionata: da una postazione fissa venivano scattati due fotogrammi per ogni spostamento con una macchina fotografica con messa a fuoco costante e senza *flash*, dal momento che era stato posizionato apposta un riflettore proprio per avere un'illuminazione ottimale e costante. Subito dopo venivano scattati, ad ogni *step*, quattro fotogrammi da posizioni simili ma non identiche. I fotogrammi presi da posizione variabile simulavano una situazione molto verosimile, ovvero una situazione in cui non si ha la possibilità di tenere costantemente un cavalletto posizionato (in un arco di tempo di diversi mesi ad esempio normalmente non si può lasciare fisso un cavalletto), ed in cui non è possibile acquisire dei fotogrammi esattamente frontali rispetto al fessurimetro moiré applicato. Ecco perché sono stati acquisiti questi quattro fotogrammi per ogni spostamento successivo, dei quali i primi tre (uno da destra, uno centrale, uno da sinistra) avevano come soggetto la faccia dei blocchi di calcestruzzo che è stata chiamata "anteriore", ovvero quella sulla quale sono stati applicati la maggior parte degli strumenti; e l'ultimo aveva come soggetto la faccia "posteriore", quella sulla quale è stato applicato, isolato, il secondo fessurimetro moiré, quello inclinato di 30° circa.

Dopo aver fatto la prima serie di fotografie (1 + 4), si è potuto iniziare ad applicare gli spostamenti con la pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron* 8562. Per la sequenza degli spostamenti, pensata per indagare le accuratezze dei diversi strumenti della prova, si rimanda al paragrafo 4.1, in cui si parla in maniera specifica anche di questo.

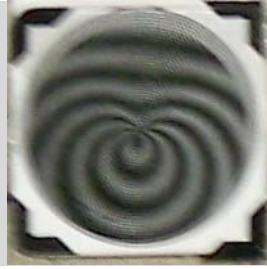
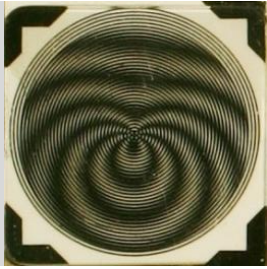
Di seguito si riporta la sequenza dei fotogrammi acquisiti. La tabella che segue ha quattro colonne nelle quali vengono inseriti:

- Spostamento imposto attraverso la pressa *Instron* 8562 e corretto con i dati ricavati dagli strumenti elettrici fino allo spostamento pari a 2 mm (con il meno aggiunto si rappresenta il fatto che la misura è ripetuta “in discesa”);
- Fotogramma “A”: frontale alla faccia “anteriore” acquisito dalla macchina fotografica da posizione fissa;
- Fotogramma “B”: circa frontale alla faccia “anteriore” acquisito dalla macchina fotografica a posizione variabile;
- Fotogramma “C”: circa frontale della faccia “posteriore” acquisito dalla macchina fotografica a posizione variabile.

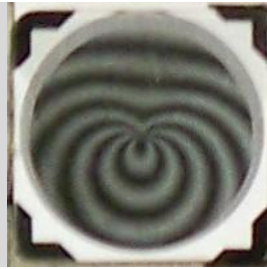
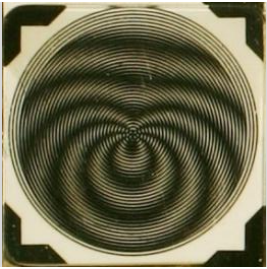
Trasduttori+ Instron (mm)	Fotogramma “A”		Fotogramma “B”	Fotogramma “C”
0.00				
0.006				
0.014				



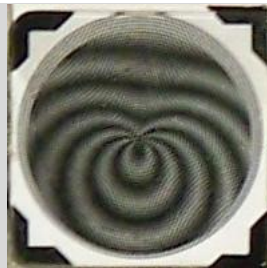
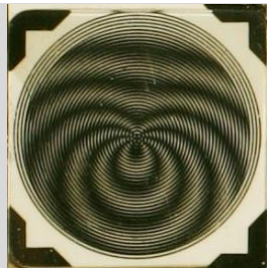
1.007



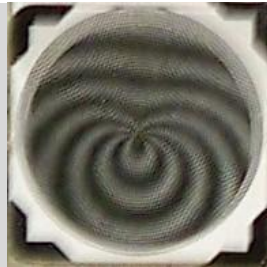
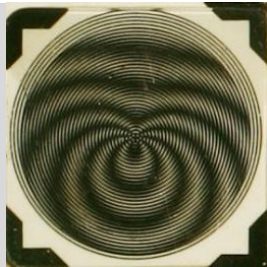
1.027



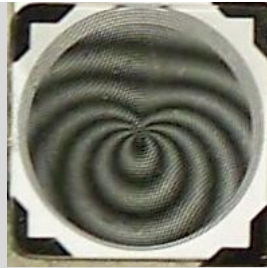
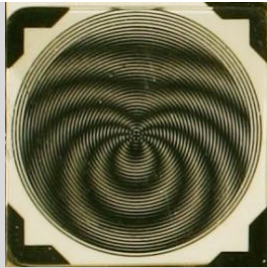
1.047



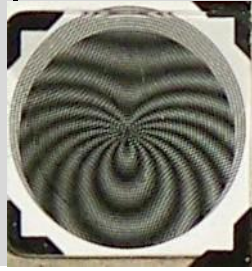
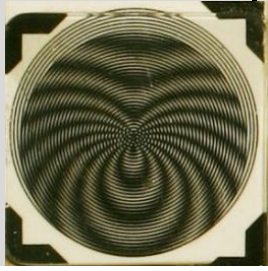
1.067



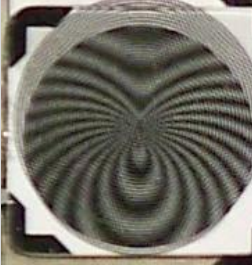
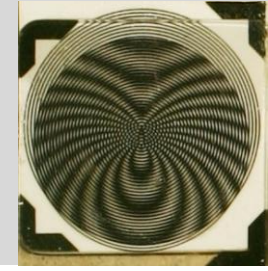
1.088



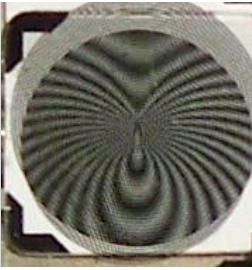
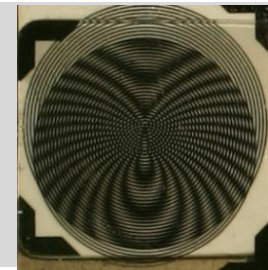
2.033



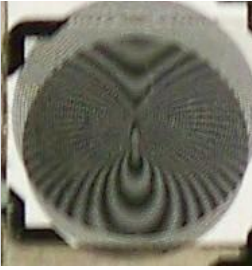
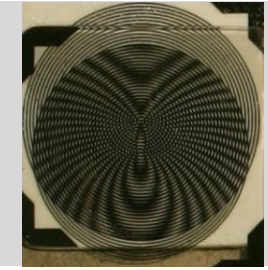
3



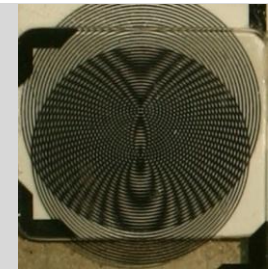
4



5



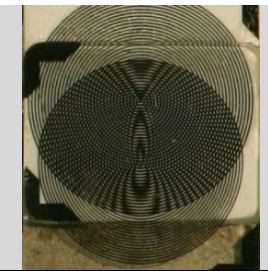
7



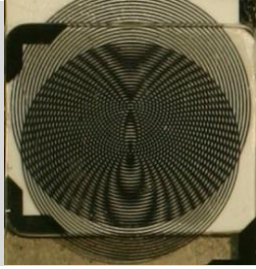
x

x

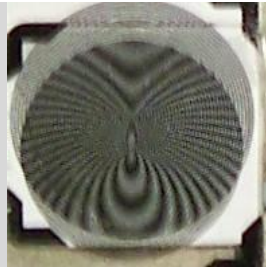
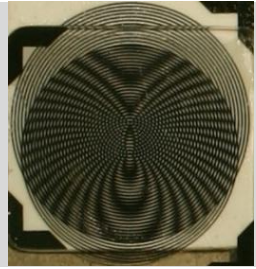
10



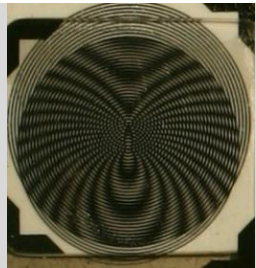
7-



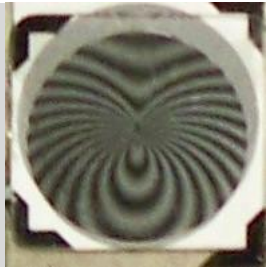
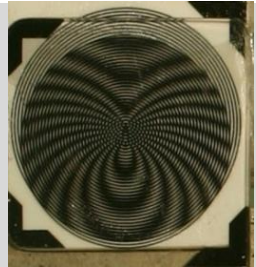
5-



4-



3-



2-



1-					
0.5-					
0.2-					
0.1-					
0.00-			x		x

Tabella 18 – Abaco dei fotogrammi presi durante la prova per supportare l’analisi successiva dei retini con griglie di cerchi concentrici dei fessurimetri moirè. Con il segno “-” dopo la misura si evidenzia il fatto che i fotogrammi fanno riferimento agli spostamenti presi una seconda volta “in discesa”

Per ogni spostamento è stato fissato su uno dei due blocchi di calcestruzzo un piccolo pezzetto di carta con stampato sopra l'entità dello spostamento avvenuto. In questa maniera il dato dello spostamento è stato inserito in ogni fotogramma ed è stata evitata la possibilità di confusione nella loro gestione successiva e, soprattutto considerando il fatto che i fotogrammi acquisiti sono molto simili tra loro.

Purtroppo bisogna dare spiegazione delle "x" che riempiono le celle che sono rimaste vuote: data la velocità delle operazioni in laboratorio sono sfuggite due serie di fotogrammi (quelli relativi agli spostamenti 7 mm e 0.00- mm). La serie di scatti realizzati da posizione costante è per fortuna completa invece e sarà soprattutto su di essa che si baseranno le considerazioni successive.

4.5.2_Elaborazione dei fotogrammi e interpretazione dei dati

La fase di elaborazione dei fotogrammi del fessurimetro moiré è stata discussa puntualmente nel capitolo 3 di questa tesi. Il programma informatico per l'elaborazione è stato messo a punto da poco, ma funziona già piuttosto bene. Ovviamente con la pratica potrebbe anche essere perfezionato, soprattutto nella parte che analizza l'immagine per ricavare il baricentro dei due retini del fessurimetro.

In breve bisogna inserire nel programma la cartella di lavoro da dove prendere tutte le immagini da analizzare. In seguito per ogni fotogramma viene richiesto di cliccare nel centro approssimativo dei retini. Successivamente avviene l'elaborazione vera e propria della prima immagine e, se tutto è corretto, in un riquadro appare la stessa immagine ingrandita con evidenziati i segni angolari ("L"), una linea corrispondente alla direzione di riferimento e la direzione di spostamento individuata. L'ultima riga che indica lo spostamento, con i suoi estremi, mostra anche l'intervallo utilizzato per i raggi uscenti dal centro. Alla fine dell'elaborazione di ogni immagine viene indicato lo spostamento e viene richiesta l'accettazione del processamento. A questo punto si passa all'immagine successiva. Alla fine dell'elaborazione di tutte le immagini compaiono i risultati in formato testo.

La procedura appena spiegata è stata svolta solamente per le immagini scattate da posizione fissa, ovvero dalla macchina fotografica (*modello Canon EOS 300D DIGITAL*) posta su un cavalletto. Le immagini per ogni spostamento sono due e sono state entrambe analizzate.

La prima tabella che viene proposta nella prossima pagina contiene:

- Spostamenti imposti attraverso la pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron 8562* (mm);
- Valori ottenuti attraverso l'elaborazione dei due fotogrammi (A e B) corrispondenti allo stesso spostamento della pressa *Instron* (mm);

- Media matematica dei due valori ottenuti attraverso l'elaborazione dei fotogrammi corrispondenti allo stesso spostamento della pressa *Instron* (mm);
- Spostamento relativo calcolato dalla differenza tra ogni misura e quella iniziale (mm).

Sp. Instron (mm)	Fotogramma A (mm)	Fotogramma B (mm)	Media (mm)	Sp. Relativo (mm)
0	-0,026	-0,028	-0,027	0
0,01	-0,023	-0,022	-0,022	0,005
0,02	-0,016	-0,016	-0,016	0,011
0,04	0,000	0,001	0,001	0,028
0,06	0,029	0,025	0,027	0,054
0,08	0,051	0,047	0,049	0,076
0,1	0,073	0,071	0,072	0,099
0,2	0,171	0,171	0,171	0,198
0,5	0,475	0,475	0,475	0,502
1	0,983	0,985	0,984	1,011
1,02	1,001	1,003	1,002	1,029
1,04	1,023	1,022	1,023	1,050
1,06	1,042	1,045	1,044	1,071
1,08	1,057	1,062	1,060	1,087
2				

Tabella 19 – I valori degli spostamenti calcolati attraverso l'elaborazione dei retini del fessurimetro moiré per ognuno dei due fotogrammi corrispondenti allo stesso spostamento della pressa Instron; la media dei due valori e quindi gli spostamenti relativi

Prima di trarre delle conclusioni occorre però redigere un'ulteriore tabella che consideri allo stesso tempo anche i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi. Questi ultimi dati saranno anche in questo caso il punto di riferimento più attendibile con il quali confrontare le misure effettuate attraverso gli altri metodi. Nella prossima pagina si riporta una tabella con i seguenti valori:

- Spostamenti imposti attraverso la pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron* 8562 (mm);
- Spostamenti relativi ottenuti attraverso i trasduttori induttivi (mm);

- Spostamenti relativi calcolati attraverso l'elaborazione dei fessurimetri moirè (mm);
- Differenza tra le due precedenti serie di valori (mm).

Sp. Instron (mm)	Trasduttori induttivi (mm)	Moirè (mm)	Differenza (mm)
0	0,000	0	0
0,01	0,006	0,005	-0,001
0,02	0,014	0,011	-0,003
0,04	0,031	0,028	-0,003
0,06	0,051	0,054	+0,003
0,08	0,071	0,076	+0,005
0,1	0,089	0,099	+0,010
0,2	0,193	0,198	+0,005
0,5	0,495	0,502	+0,007
1	1,007	1,011	+0,004
1,02	1,027	1,029	+0,002
1,04	1,047	1,050	+0,003
1,06	1,067	1,071	+0,004
1,08	1,088	1,087	-0,001
2	2,033		

Tabella 20 – Per ogni fotogramma si riportano i valori degli spostamenti calcolati attraverso l'elaborazione dei retini del fessurimetro moirè, i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi e la differenza tra questi due dati

Entrambe le tabelle che sono state riportate in questo paragrafo non tengono in considerazione gli spostamenti oltre i 2 mm. E' stata eseguita questa cernita dal momento che dopo quello spostamento i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi perdono di significato e si ha già avuto modo di segnalare come quegli strumenti forniscano per tutta questa prova il punto di riferimento per il paragone. Una base di confronto di quindici misurazioni comunque è già un campione piuttosto solido per poter trarre delle prime conclusioni.

Anche se il programma dell'analisi dei fessurimetri è stato appena creato, ed è di fatto alle sue prime elaborazioni, i risultati sembrano molto incoraggianti. La colonne delle differenze con i valori dei trasduttori induttivi evidenzia un'accuratezza molto buona, nell'ordine di $\pm 0,005$ mm ($5 \mu\text{m}$).

La bassissima discrepanza poi tra i due valori ottenuti dall'analisi dei fotogrammi corrispondenti allo stesso spostamento lascia intendere una buonissima ripetibilità delle misure (attorno a $\pm 0,001$ mm).

Questi ottimi risultati vanno aggiunti alla serie di vantaggi che l'utilizzo di questo strumento può portare: il costo contenuto e la praticità della sua messa in esercizio.

Detto questo bisogna comunque ricordare che rimane da eseguire una verifica per spostamenti relativamente meno piccoli (superiori ai 5 mm), anche se la prova ha come oggetto proprio quelle misure che capita maggiormente di analizzare nel monitoraggio statico delle fessure, che il più delle volte subiscono degli spostamenti proprio nell'ordine dei centesimi o decimi di millimetro.

Inoltre sono ancora da eseguire anche le elaborazioni dei fotogrammi scattati da posizione variabile, i quali potrebbero verosimilmente vedere un aumento dell'errore medio (così come si vedrà per il metodo dell'analisi delle immagini).

I risultati proposti rimangono comunque molto soddisfacenti e potranno solamente migliorare in futuro. L'utilizzo di questo strumento sembra aver trovato la corretta analisi diretta che consenta di ricavare il dato dello spostamento relativo dei due lembi di una fessura in maniera estremamente precisa. Si vuole ricordare che fino ad ora l'utilizzo consigliato dai produttori dello strumento presentato in questo paragrafo consisteva in un'analisi indiretta dei retini. Il disegno di interferenza formato dai retini andava confrontato con quelli catalogati in una banca dati per ritrovare quello più simile. A quel punto il dato dello spostamento del disegno di interferenza più simile veniva accettato come approssimazione dello spostamento della fessura oggetto del monitoraggio.

4.6_Analisi delle immagini

Il quinto ed ultimo metodo di misurazione che viene trattato in questo capitolo, tra tutti quelli presi in considerazione nella prova eseguita in laboratorio al dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano in data 05/02/2010, utilizza come strumenti semplicemente una macchina fotografica, un cavalletto, una griglia di riferimento e delle mire poste sui due lati opposti della fessura. Si ricorda ancora una volta che il metodo in questione non viene utilizzato nella prova per informarci di uno spostamento (come poi avverrebbe nei casi reali), bensì saranno proprio le informazioni ed i dati dedotti dall'analisi delle immagini ad essere indagate nel confronto diretto con i dati degli spostamenti noti, imposti grazie alla pressa elettromeccanica servocontrollata *Instron* 8562, che è presente in laboratorio, e corretti grazie ai dati ricavati dai trasduttori induttivi.

Questa tecnica rappresenta, assieme alla precedente, una innovazione per quanto riguarda il monitoraggio delle fessure, o più in generale per la misurazione degli spostamenti piccoli o molto piccoli (siamo nell'ordine del centesimo/decimo di millimetro per le fessure che capita di studiare) e per questo l'interesse che gravita su di essa deve essere massimo. La descrizione del procedimento che sta alla base di questa tecnica è stato descritto nel paragrafo 3.2 di questa stessa tesi e si rimanda ad esso per un approfondimento su questo tema. Nella prova di laboratorio che viene trattata in questo quarto capitolo si descrivono puntualmente solo le operazioni effettivamente svolte in quella giornata (05/02/2010), e da queste si parte per considerazioni successive sull'accuratezza di ogni metodo, sia singolarmente che messe a confronto le une con le altre in conclusione.

Questo metodo, tra tutti quelli considerati, è quello che in assoluto prevede il minore dispendio economico, in quanto le mire sono semplicemente dei puntini neri stampati su carta normale (così come la griglia di riferimento) e la macchina fotografica non rappresenta un costo fisso per ogni differente studio, ma è un costo che va suddiviso su tutta la sua vita utile, che ovviamente ci si aspetta comprenda svariati lavori nel corso del tempo. Il grosso del lavoro viene svolto rapidamente da un programma informatico successivamente all'acquisizione delle fotografie, ed ha come finalità il ritrovamento dei dati degli spostamenti differenziali dei due lati di una fessura. Ne deriva che l'impiego maggiore di tempo avviene nella prima fase di preparazione all'acquisizione dei fotogrammi.

Un altro vantaggio di questo metodo è rappresentato dal fatto che non è necessario garantire la massima stabilità del punto di presa dei fotogrammi. Anche se conviene non variarlo di molto per non modificare l'accuratezza delle misurazioni da un'immagine all'altra, si possono prendere i diversi fotogrammi anche liberamente, in quanto si sa bene che il programma che analizza poi le immagini è in grado, grazie alla griglia di riferimento, di scalarle e calibrarle tutte nello stesso modo.



Figura 197 – La stampa dalla quale sono state ricavate le mire e la griglia di riferimento



Figure 198 e 199 – La macchina fotografica, modello Canon EOS 300D DIGITAL, il cavalletto ed il riflettore ancora spento

Per la preparazione della prova non c'è stato bisogno di un grosso lavoro. E' stato stampato un grosso foglio da cui è stata ricavata la griglia di riferimento (formata da diciannove colonne e quattordici righe di pallini neri identici tra loro in questo caso), in maniera tale che si potesse inserire comodamente su uno dei due blocchi di calcestruzzo della prova tra gli altri strumenti applicati. Le mire (che sono pallini neri uguali a quelli della griglia di riferimento) sono state tagliate singolarmente e posizionate (nel numero di quattro per lato) ad una distanza di circa 3 cm dalla fessura, per quelle sul blocco superiore, e di circa 5 cm per quelle incollate sul blocco inferiore,

volutamente non in maniera particolarmente precisa. L'incollaggio delle mire e della griglia di riferimento è stato effettuato tramite una normale colla per carta.

Più ancora che per gli altri metodi, in questo caso è necessario giustapporre dei segnali che indichino in maniera inequivocabile a quale spostamento fa riferimento un certo fotogramma, che altrimenti andrebbe facilmente confuso con quelli degli spostamenti simili.

Per quanto riguarda la sequenza degli spostamenti noti che sono stati decisi, si rimanda al paragrafo 4.1 che tratta in maniera specifica anche questo argomento. Si ricorda solo che è stata scandita ed accorciata la loro differenza per poter indagare in maniera opportuna l'accuratezza di tutti gli strumenti, compreso il metodo dell'analisi delle immagini.

Acceso il riflettore, tutto era pronto per iniziare l'acquisizione dei fotogrammi con una macchina fotografica posta su un cavalletto (da posizione fissa perciò) e con messa a fuoco costante e con un'altra da posizione variabile. Per ogni spostamento sarebbero stati acquisiti due fotogrammi identici dalla prima e quattro (da posizioni diverse) dalla seconda. Le fotografie sono state prese anche per gli spostamenti "in discesa", ovvero ripetuti in maniera decrescente una volta arrivati a quello che è stato deciso come picco (10 mm).

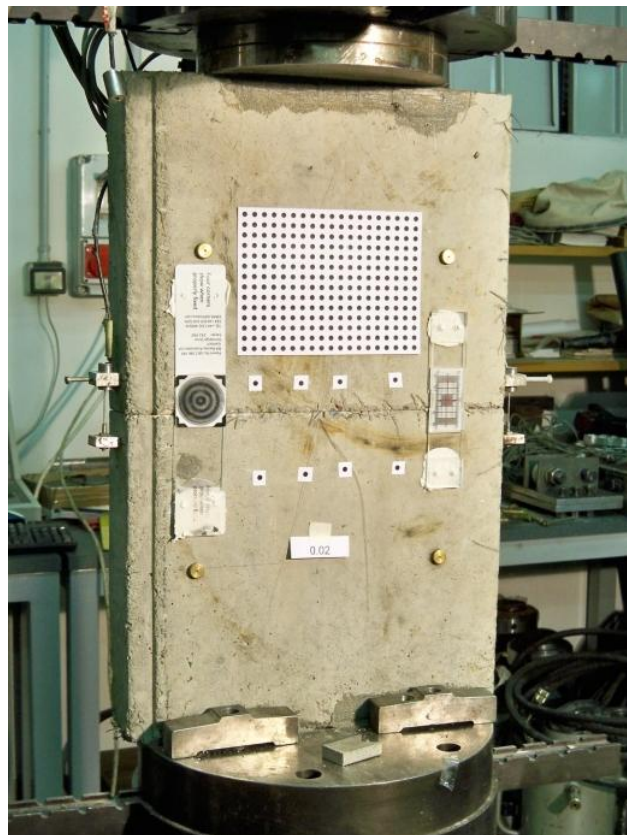


Figura 200 – Le mire e la griglia di riferimento per l'analisi delle immagini insieme agli altri strumenti applicati

4.6.1_La fase di elaborazione dei fotogrammi e di gestione dei dati

L'analisi delle immagini che si propone è un metodo composto essenzialmente da due fasi: la prima consiste nell'acquisizione di immagini nelle quali si vedano chiaramente la griglia di riferimento e le mire. Questa fase è stata svolta per la prova nel corso di poche ore di lavoro, mentre nelle situazioni reali ha la necessità di spalmarsi su un lungo periodo di tempo che si vuole utilizzare come base di riferimento per studiare i movimenti in atto su di una fessura. Logicamente la scansione temporale della presa dei fotogrammi si farà variare a seconda delle circostanze e sarà più frequente nei casi più critici, o magari se ne può incrementare la frequenza in un secondo momento dopo aver riscontrato un'accelerazione sospetta dei movimenti.

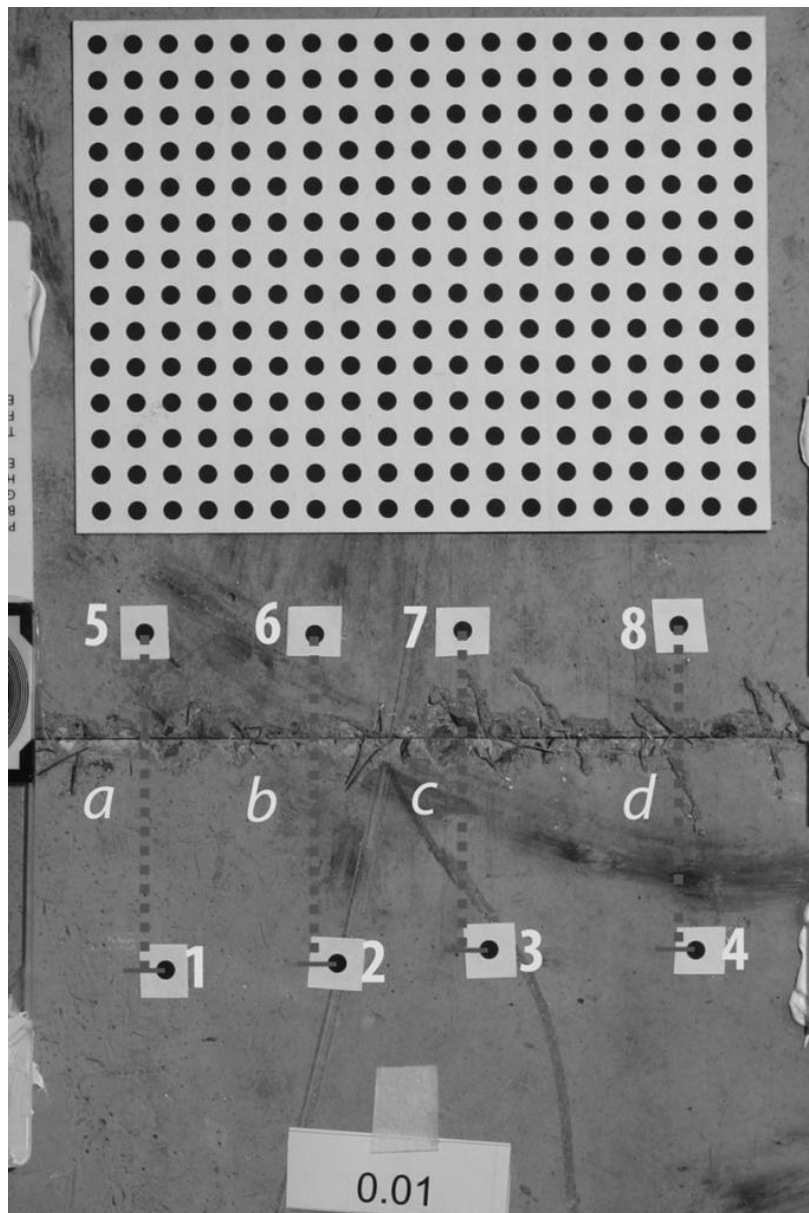


Figura 201 – La griglia di riferimento e le mire utilizzate durante la prova in laboratorio

La seconda fase che compone questo metodo consiste nell'analisi vera e propria delle immagini. Lo studio si svolge automaticamente fotogramma dopo fotogramma. Per ogni scatto il programma informatico si basa sulla griglia di riferimento, che permette di effettuare la calibrazione, di scalare le immagini e di individuare un'origine degli assi coordinati. Da questo si arriva poi, tramite pochi passaggi, alle coordinate di tutte le mire. Ottenute le coordinate delle mire, si misurano matematicamente le lunghezze delle basi per ogni coppia di mire. Nella prova le otto mire (1, 2, 3, ..., 8) si accoppiano a due a due per formare le quattro basi (a , b , c e d) come si può vedere nella figura della pagina precedente, delle quali si analizza la lunghezza. Per ogni *step* le lunghezze delle basi vengono confrontate con quelle di partenza e dalla loro differenza si ottiene lo spostamento effettivamente avvenuto. Si ricorda come, anche per questo metodo di misurazione, le distanze calcolate acquisiscono importanza dal confronto con i dati ottenuti dai trasduttori induttivi (in assoluto il metodo più affidabile) in quanto questa prova è propriamente finalizzata a verifiche sulle diverse accuratèzze.

In seguito si riportano i dati ottenuti dall'analisi delle immagini. In primo luogo si vedrà una tabella che contiene tutti i dati che entrano in gioco: i valori "corretti" degli spostamenti misurati con i trasduttori induttivi; i valori coordinati di ogni punto (x , y); la lunghezza misurata delle basi; la differenza tra la lunghezza delle basi misurata rispetto a quella iniziale (a spostamento nullo). Questa tabella è piuttosto laboriosa in quanto prevede 25 colonne: 16 valori per le coordinate delle mire ($8x + 8y$); 4 valori per le lunghezze misurate; 4 valori per le differenze; 1 valore per lo spostamento "corretto". Per alleggerire la lettura dei valori dunque si riportano tutti quanti i valori solamente per pochi passaggi tipo della prova. Successivamente a questa prima tabella ne viene redatta un'altra completa, che non prevede le colonne dedicate a tutti i singoli valori delle coordinate punto per punto. Una tabella con nove colonne (e 20 righe) è sicuramente più leggibile ed al tempo stesso è sufficiente a fornire tutte le informazioni necessarie.

Le tabelle complete sono due, delle quali la prima contiene i valori ottenuti dall'analisi delle immagini prese con una *Canon EOS 300D Digital* da una posizione fissa, mentre la seconda esprime i valori ottenuti dai fotogrammi scattati con una *Kodak digitale V1273*, a posizione variabile. Per questa seconda analisi verranno esclusi i primissimi spostamenti (valori inferiori di 0,1 mm) in quanto hanno fornito valori poco attendibili.

Qui di seguito si riporta la prima tabella:

Trasduttori (mm)	x1	y1	x2	y2	x3	y3	x4
0.000 (1°)	-102630	13302	-101372	51536	-98505	85366	-98869
0.000 (2°)	-102633	13869	-101375	52101	-98508	85932	-98871
[...]
0.089 (1°)	-102404	13571	-101152	51805	-98285	85636	-98653
0.089 (2°)	-102556	13411	-101302	51650	-98439	85480	-98810

y4	x5	y5	x6	y6	x7	y7	x8	y8
131369	-27682	9292	-28188	47225	-27545	80214	-26649	128357
131962	-27687	9858	-28193	47792	-27549	80778	-26653	128922
...
131667	-27359	9602	-27868	47531	-27233	80520	-26331	128661
131514	-27503	9449	-28011	47381	-27367	80367	-26479	128509

LB a	LB b	LB c	LB d	$\Delta B a$	$\Delta B b$	$\Delta B c$	$\Delta B d$
74947	73182	70959	72220	0,000	0,000	0,000	0,000
74945	73181	70958	72217	-0,002	-0,001	-0,001	-0,003
...
75047	73283	71061	72321	0,099	0,101	0,102	0,101
75052	73290	71072	72331	0,105	0,108	0,112	0,111

Tabella 21 – Elaborazione analitica dei valori delle mire e delle basi dall'analisi delle immagini. Per ogni fotogramma (due per spostamento della pressa Instron 8562) si riportano i valori delle coordinate delle mire (x, y), la lunghezza calcolata tra le coppie di mire ed infine lo spostamento netto per ogni base. Il termine di paragone è la lettura 0.00 (1°)

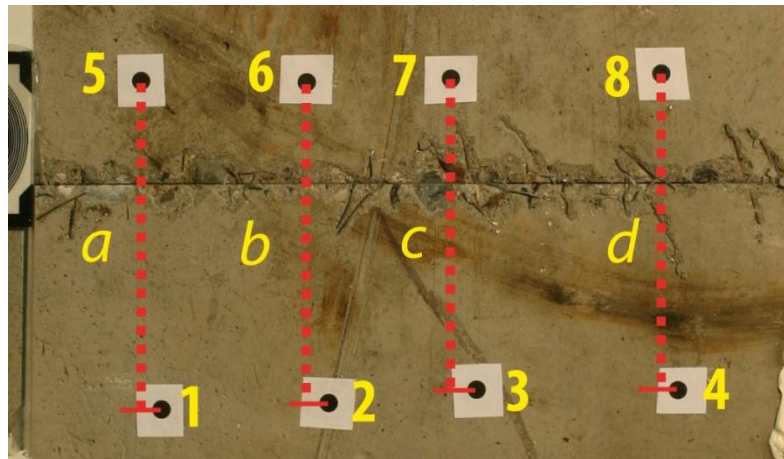


Figura 202 – La nomenclatura delle mire e delle basi considerate nella tabella precedente

Dopo aver esplicitato in maniera analitica il procedimento che ha portato al calcolo del valore degli spostamenti attraverso l'analisi delle immagini, è arrivato il momento di considerare i valori ottenuti nel loro complesso, per ogni spostamento della prova in laboratorio, e di paragonarli ai dati degli spostamenti reali per trarre poi delle conclusioni sull'accuratezza del metodo che è oggetto di questo paragrafo. I valori della tabella che segue fanno riferimento alle fotografie scattate da una posizione fissa.

Nella prossima tabella si riportano:

- Valori degli spostamenti “corretti” ricavati grazie ai trasduttori induttivi (mm) fino alla misura di 2 mm; da quello spostamento in poi si inseriscono i valori della pressa *Instron* 8562 (mm);
- Valori degli spostamenti misurati attraverso l'analisi delle immagini per ognuna delle 4 basi (mm);
- Media dei valori delle singole basi (mm);
- Differenza tra la media dei valori ottenuti con l'analisi delle immagini e quelli ricavati dai trasduttori induttivi (mm).

Trasduttori+					Media basi	Differenza
Instron (mm)	$\Delta B a$	$\Delta B b$	$\Delta B c$	$\Delta B d$	(mm)	(mm)
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
0,006	0,008	0,011	0,009	0,016	0,011	+0,005
0,014	0,012	0,014	0,023	0,024	0,018	+0,004
0,031	0,026	0,027	0,035	0,038	0,031	0,000
0,051	0,052	0,049	0,053	0,051	0,051	0,000
0,071	0,079	0,082	0,079	0,076	0,079	+0,008
0,089	0,099	0,101	0,102	0,101	0,101	+0,012
0,193	0,206	0,202	0,206	0,200	0,203	+0,010
0,495	0,504	0,503	0,502	0,501	0,502	+0,007
1,007	1,024	1,025	1,021	1,020	1,022	+0,015
1,027	1,048	1,043	1,044	1,040	1,044	+0,017
1,047	1,073	1,068	1,066	1,062	1,067	+0,020
1,067	1,082	1,074	1,081	1,071	1,077	+0,010
1,088	1,097	1,093	1,096	1,087	1,093	+0,005
2,033	2,051	2,041	2,036	2,030	2,039	+0,006
3	3,094	3,088	3,084	3,068	3,083	
4	4,108	4,099	4,096	4,084	4,097	
5	5,119	5,111	5,109	5,093	5,108	
7	7,164	7,150	7,146	7,133	7,148	
10	10,222	10,209	10,199	10,181	10,202	
7-	7,147	7,133	7,130	7,110	7,130	
5-	5,126	5,116	5,112	5,098	5,113	
4-	4,117	4,106	4,102	4,086	4,103	
3-	3,099	3,083	3,083	3,067	3,083	
2-	2,082	2,074	2,067	2,060	2,071	
1-	1,058	1,050	1,047	1,037	1,048	
0,5-	0,567	0,555	0,552	0,543	0,554	
0,2-	0,264	0,254	0,251	0,242	0,252	
0,1-	0,159	0,146	0,147	0,136	0,147	
0,0-	0,060	0,056	0,049	0,042	0,052	

Tabella 22 – Per ogni fotogramma si riportano i valori degli spostamenti calcolati attraverso l’analisi delle immagini sulle quattro basi (a, b, c e d, la media dei valori e la differenza con i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi. Con il segno “-” si evidenziano gli spostamenti ripetuti “in discesa”

Prima ancora di fare qualsiasi ragionamento o deduzione sulla tabella precedente, viene riportata immediatamente un'altra tabella che, analogamente alla precedente, considera i valori degli spostamenti noti e di quelli misurati, ma questa volta analizza le immagini scattate in laboratorio con la fotocamera non fissata sul cavalletto. Oltre alla posizione variabile anche la qualità degli scatti è stata inferiore a quella dei fotogrammi presi in considerazione nella tabella qui sopra. Non vengono inseriti in questa ultima tabella i dati relativi ai primi spostamenti (quelli fino a 0.08 mm), perché i valori ottenuti non sembravano attendibili. La tabella è formata dalle stesse colonne della precedente, ovvero:

- Valori degli spostamenti “corretti” ricavati grazie ai trasduttori induttivi (mm) fino alla misura di 2 mm; da quello spostamento in poi si inseriscono i valori della pressa *Instron* 8562 (mm);
- Valori degli spostamenti misurati attraverso l'analisi delle immagini per ognuna delle 4 basi (mm);
- Media dei valori delle 4 basi misurati attraverso l'analisi delle immagini (mm);
- Differenza tra la media dei valori ottenuti con l'analisi delle immagini e quelli ricavati dai trasduttori induttivi (mm).

Trasduttori+					Media basi	Differenza
Instron (mm)	$\Delta B a$	$\Delta B b$	$\Delta B c$	$\Delta B d$	(mm)	(mm)
0.000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
0.089	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	-
0.193	0,234	0,254	0,231	0,248	0,242	+0,049
0.495	0,480	0,474	0,473	0,488	0,479	-0,016
1.007	1,070	1,061	1,001	1,020	1,038	+0,031
1.027	0,962	0,968	0,988	1,011	0,982	-0,045
1.047	1,056	1,051	1,036	1,074	1,054	+0,007
1.067	1,066	1,075	1,063	1,062	1,066	-0,001
1.088	1,118	1,100	1,054	1,071	1,086	-0,002
2.033	1,946	1,962	1,951	2,000	1,965	-0,068
3	3,074	3,044	3,007	3,017	3,035	
4	4,095	4,115	4,110	4,108	4,107	
5	5,038	5,045	5,060	5,057	5,050	
7	-	-	-	-	-	
10	10,170	10,199	10,136	10,155	10,165	
7-	7,015	7,031	7,030	7,047	7,031	
5-	5,144	5,187	5,142	5,144	5,154	
4-	4,128	4,137	4,120	4,092	4,119	
3-	3,002	3,030	3,055	3,083	3,042	
2-	2,153	2,151	2,055	2,016	2,042	
1-	1,013	1,018	1,025	1,030	1,021	
0.5-	0,473	0,474	0,453	0,488	0,472	
0.2-	0,310	0,305	0,281	0,274	0,292	
0.1-	0,111	0,117	0,104	0,120	0,113	
0.00-	-	-	-	-	-	

Tabella 23 – Per ogni fotogramma scattato da posizione variabile si riportano i valori degli spostamenti calcolati attraverso l'analisi delle immagini sulle 4 basi (a, b, c e d), la media dei valori e la differenza con i valori ottenuti attraverso i trasduttori induttivi.. Con il segno“-“ evidenzio gli spostamenti ripetuti “in discesa”

4.6.2 Interpretazione dei dati e conclusioni

Il metodo dell'analisi delle immagini ha evidenziato molti aspetti positivi durante (e dopo) la prova eseguita nel laboratorio di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano. Innanzitutto la sua preparazione è stata breve e piuttosto semplice: non viene richiesto nessuno strumento particolare, se non una macchina fotografica digitale con una buona risoluzione (cavalletto e riflettore possono non essere utilizzati nella maggior parte dei casi) e dei semplici fogli con stampate le mire. Dagli stessi si ricaverà anche la griglia di riferimento. Verosimilmente mire e griglia di riferimento possono essere pronte per il primo scatto anche pochi minuti dopo che l'operatore è arrivato in sito. Anche l'elaborazione delle fotografie è avvenuta in maniera immediata. E' stato spiegato come, attraverso il programma informatico (paragrafo 3.2), basti inserire pochi dati per ottenere un foglio di lavoro che illustra tutti i risultati ricercati.

A fronte di questa incredibile semplicità di utilizzo sembrerebbe logico attendersi un'accuratezza piuttosto bassa. Invece non è affatto così. Facendo una media degli spostamenti ottenuti attraverso le quattro basi considerate nella prova, si possono trovare divergenze con i valori ricavati dai trasduttori induttivi che non superano mai i 0.02 mm per i fotogrammi scattati da posizione fissa, e valori poco meno accurati per la serie di fotogrammi presi da posizione variabile (gli errori variano abbastanza ed il dato peggiore è di 0.06 mm diverso da quello dei trasduttori).

Si vuole informare in questo momento come (probabilmente) sia stata la migliore qualità della macchina fotografica *Canon EOS 300D Digital*, più che il fatto che fosse a posizione costante, la variabile fondamentale che ha fatto in modo che si ricavassero valori più corretti con quello strumento.

I risultati che sono stati ottenuti sono più che soddisfacenti. Si rimanda comunque al capitolo conclusivo di questa tesi per un più ampio e rigoroso confronto tra i vantaggi e gli svantaggi di tutti i metodi presi in considerazione durante la prova in laboratorio del 05/02/2010.

4.7 Conclusioni sulle verifiche svolte in laboratorio

Grazie alla prova svolta nel laboratorio del dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano in data 05/02/2010 sono stati ricavati per ogni metodo un buon numero di misure da mettere in relazione tra di loro. I valori delle singole misure sono riportati insieme e messi a confronto nel prossimo grafico:

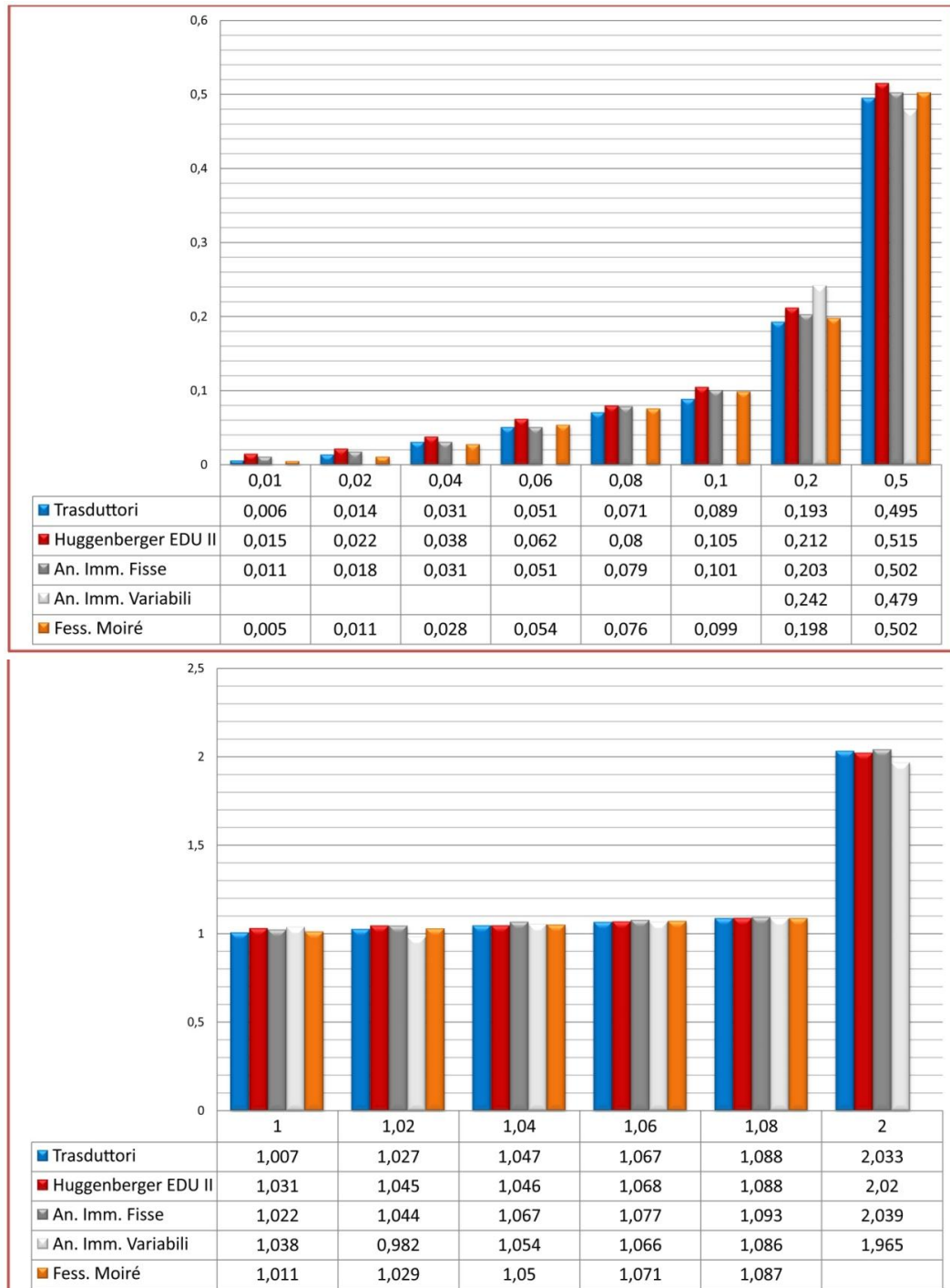


Figure 203 e 204 – Grafici a barre che mettono a confronto i valori delle misure ricavate con i metodi utilizzati nello svolgimento della prova in laboratorio. In basso si evidenziano i valori numerici

I valori che sono stati messi a confronto si arrestano con lo spostamento pari a 2 mm. E' stata operata questa selezione dal momento che gli strumenti elettrici, i più attendibili tra quelli a disposizione, non hanno fornito valori per gli spostamenti superiori a quello, dal momento che superavano il loro fondo scala.

Prima di iniziare a fare delle valutazioni in merito all'accuratezza dei diversi metodi di misurazione è necessario però riportare un altro grafico che mette in risalto solamente le differenze tra le misure in termini assoluti. Il termine di confronto per la valutazione degli errori commessi saranno i dati ottenuti attraverso i trasduttori induttivi.

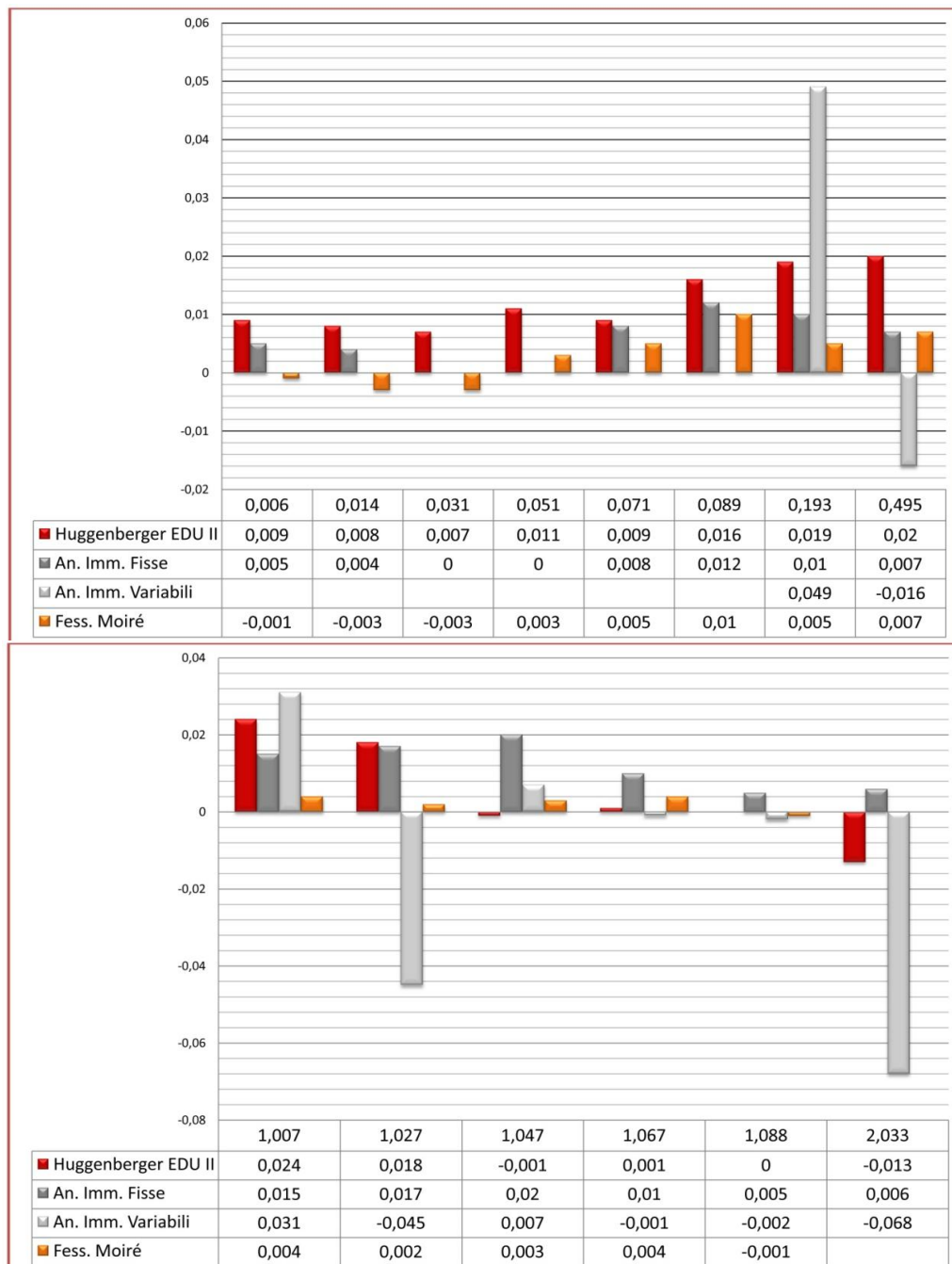


Figure 205 e 206 – Grafici a barre che mettono a confronto gli errori assoluti delle misure ricavate con i metodi utilizzati nello svolgimento della prova in laboratorio in rapporto ai valori dei trasduttori induttivi

Sulla base della preparazione della prova e dei valori numerici ricavati attraverso i diversi metodi di misurazione si possono fare le seguenti considerazioni:

- I tempi di installazione dei vari strumenti si attesta grossomodo intorno ai quindici minuti, eccezion fatta per i trasduttori induttivi (LVDT) per i quali è necessario un periodo di tempo leggermente superiore;
- I fondi scala di tutti gli strumenti, tranne i trasduttori induttivi utilizzati, sono adeguati allo studio dei movimenti che normalmente si verificano sulle fessure;
- I trasduttori induttivi utilizzati nella prova (del tipo *W1ELA/0-2*) hanno un fondo scala piccolo (± 2 mm) e pertanto è consigliabile utilizzare insieme ad essi altri strumenti con un fondo scala maggiore;
- Le risoluzioni degli strumenti verificati è sempre adeguata (0,001 mm), tranne che per i fessurimetri piani (0,5 mm);
- I tempi di elaborazione delle immagini e dei retini dei fessurimetri moiré sono accettabili e possono essere ulteriormente ridotti;
- L'accuratezza dei tre principali metodi confrontati con gli strumenti elettrici (deformometri meccanici, elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré, analisi delle immagini) è inferiore a ± 0.01 mm, e per questo è adatta allo studio dei movimenti di una fessura;
- L'accuratezza del deformometro utilizzato nella prova (*Huggenberger EDU II*) è risultata inferiore alle aspettative ($\pm 0,02$ mm), ma è stato verificato che si tratta di una anomalia del singolo strumento;
- L'analisi delle immagini eseguite da posizione variabile hanno un'accuratezza inferiore alle analoghe fatte da posizione fissa (fenomeno probabilmente legato soprattutto alla minore risoluzione di quei fotogrammi);
- L'elaborazione dei retini del fessurimetro moiré risente in maniera minore della risoluzione delle immagini in quanto elabora il disegno di interferenza delle frange, che amplifica i piccoli spostamenti dei retini.

Preparando e svolgendo la prova si sono trovati alcuni spunti per lo sviluppo del fessurimetro moiré e più precisamente si potrebbe:

- Dotare il componente trasparente, che si deve sovrapporre a quello bianco, di uno spessore tale che risulti agevole porli in maniera complanare;

- Aumentare lo spessore di entrambi i componenti del fessurimetro per dotarli di maggiore rigidità e scongiurare il fenomeno dell'imbarco che anch'esso rende difficile la complanarità dei due retini;
- Unire i due componenti del fessurimetro con una piccola quantità di nastro adesivo da rimuovere ad incollaggio terminato;
- Utilizzare della glicerina o altre sostanze perfettamente trasparenti per garantire l'adesione dei due retini senza offuscare il disegno che essi formano;
- Modificare i segni angolari (*marker*) in cerchi o altre forme che agevolino la loro individuazione e la loro elaborazione informatica per il ritrovamento del baricentro dei due retini;
- Aumentare la larghezza dei due componenti per riuscire a dotare il fessurimetro di una zona bianca aggiuntiva che agevoli anch'essa l'elaborazione delle immagini rendendo sempre facilmente riconoscibile dal programma la zona dei retini.



Quinto Capitolo

**CONFRONTO TRA I METODI DI MISURAZIONE TRAMITE
VERIFICHE *IN SITU* AD ARCISATE**

5.1_La torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate

Le origini della chiesa collegiata di S. Vittore di Arcisate (VA) si fanno risalire al VII secolo d.C. Era certamente collegiata nel 1095, come risulta in una Bolla di Arnolfo III del 2 Novembre. Circa due secoli dopo, Goffredo da Bussero, annota nell'elenco delle chiese esistenti nella diocesi di Milano: "*Arzizate, ecclesia sancti victoris*".



Figura 207 – Il fronte principale della chiesa di S. Vittore ad Arcisate e la torre campanaria

La struttura della chiesa non ha subito modifiche sostanziali dal XVI secolo in poi, e lo si vede confrontando le misure attuali con quelle di allora.

La torre campanaria si ipotizza che sia stata costruita nell'XI secolo d.C. E' in stile romanico e si trova nell'angolo settentrionale del frontespizio della chiesa. La sua altezza attuale è di circa 36 metri ed ha una base quadrata di 5,8 m di lato. Si hanno notizie del campanile grazie agli atti delle visite

pastorali e regionali: nel 1567 si annota che la chiesa risulta consacrata e che sul campanile vi sono due campane.

Soltanto nel 1586 si parla del battistero in pietra e si dice che sul campanile vi sono due campane, sotto le quali si trova un orologio. Il campanile, tra la fine del 1500 e la metà del 1700, viene descritto come “alto, antico e dalle pareti rudi” ed in alcuni atti appare con due campane e in altri con tre. Si racconta che si ascendesse a questo da una scala in pietra all’interno della chiesa e che in sommità venne posta una piccola croce.

La torre è caratterizzata all’esterno, fino ad una altezza di circa 10 m, da una muratura eseguita in pietre irregolari, priva di decorazioni, seguita da sei ordini di piani, di cui cinque definiti nella muratura dagli spigoli in rilievo e da corrispondenti sequenze di archetti pensili che marcano i singoli piani. Il sesto ordine (il più alto) corrisponde al sopralzo eseguito in tempi più recenti (XVIII secolo d.C.) per ospitare il castello delle campane dopo che, dopo diversi cambiamenti, ora ne contiene cinque.

Tutte le facciate esterne così come quelle interne portano segni di interventi eseguiti in diversi tempi come tamponamenti di aperture esistenti o apertura di nuove. La tessitura muraria appare così spesso molto disordinata con prevalenza, localmente, di giunti verticali continui o poco sfalsati. Spesso, a causa dell’erosione dei giunti di malta, risulta difficile distinguere le zone dove c’è scarso ingranamento tra le pietre e le altre zone che presentano fessure ad andamento verticale.

I muri esterni variano di dimensione lungo l’estensione della torre. Variano da uno spessore massimo a terra di circa 1,25 m fino ad arrivare a quello minimo, al sesto ed al settimo piano, quello della cella campanaria, di circa 0,66 m.

Risalendo queste pareti con lo sguardo possiamo notare due diverse tipologie di aperture, una di forma rettangolare ed un’altra con la parte superiore ad arco a tutto sesto. La prima ha una forma stretta ed allungata e la ritroviamo ai piani bassi della torre, più precisamente al piano terreno ed al primo dei lati Nord, Ovest e Sud. Al primo piano sul lato Est si possono notare dei chiari segni che indicano un successivo tamponamento di un’apertura dello stesso tipo.

Dal secondo al quinto piano troviamo la seconda tipologia di aperture, con l’archetto, in diverse dimensioni che tendono ad ingrandirsi con l’aumentare dell’altezza da terra. Sui quattro prospetti vediamo che alcune di esse mantengono le loro caratteristiche iniziali, altre sono in parte tamponate ed infine, quelle al quinto piano, sono tutte totalmente tamponate per l’inserimento dell’orologio.

Al settimo piano si hanno due aperture soltanto sul lato Ovest, mentre sugli altri prospetti sono state totalmente tamponate in un secondo momento. Queste aperture costituivano la vecchia cella campanaria che poi venne sopraelevata pertanto, per non rendere troppo fragile la muratura in prossimità del settimo piano, vennero riempite. Si ipotizza che la sopraelevazione risalga all’anno 1761 date le incisioni poste sul lato Sud in prossimità della cella campanaria.

All'interno si accede tramite una porticina posta sul lato nord e si ascende ai piani superiori tramite una scala in ferro che dal primo piano al quinto è completata da una passerella che permette di sostare ai diversi piani in quanto i solai, composti da travetti in legno e da un assito, in alcuni tratti, non sono più in grado di sorreggere i carichi necessari. Tra il piano terreno ed il primo piano, invece, troviamo un solaio voltato in pietra. Anche al sesto ed al settimo piano, che sono rispettivamente la vecchia e la nuova cella campanaria, non si riscontra più alcuna presenza dell'assito, bensì troviamo un pavimento in pietra.

5.2_Descrizione del monitoraggio in corso

Il monitoraggio in corso sulla torre campanaria di S. Vittore di Arcisate è iniziato nell'Ottobre del 2008 ed è tutt'ora in corso (Maggio 2010). La responsabilità del progetto è del dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano.

Questo progetto di monitoraggio deriva dai risultati di una campagna di rilievo (del quadro fessurativo e del quadro del degrado) della torre, svolto sempre dallo stesso gruppo che si occupa anche del monitoraggio, nel corso del 2008, che ha evidenziato come le condizioni della torre siano precarie ma non totalmente compromesse. Non è stato necessario intervenire repentinamente con un intervento di messa in sicurezza del campanile, ma è stato possibile pensare ad un sistema di monitoraggio, statico e dinamico, che tenesse sotto controllo lo stato di sforzo ed i movimenti della torre nel corso del tempo.

Il monitoraggio in corso sulla torre campanaria non è oggetto specifico di questa tesi, ma è comunque opportuno delinearne i tratti per contestualizzare meglio la prova (che sarà oggetto dei prossimi paragrafi) che è stata svolta sul campanile, che cerca di dare dei giudizi sul grado di accuratezza dei diversi strumenti di misurazione dei movimenti delle fessure. Questo scopo spiega perché in questa sede sia più interessante trattare il sistema per il monitoraggio statico piuttosto che quello dinamico. Gli strumenti che vengono presi in considerazione in seguito, infatti, potrebbero in futuro essere utilizzati in casi come questo ed affiancarsi così ai metodi già consolidati, come i trasduttori fissi ed i comparatori removibili (le spie di gesso o vetro ed i righelli graduati vengono già considerati obsoleti).

Sulla torre sono presenti in tutto quindici trasduttori potenziometrici (modello *GEFRAN PZ67-S*) che sono collegati a delle unità *Field Point* che acquisiscono in tempo reale i valori trasmessi da ogni strumento una volta ogni ora. Questi trasduttori hanno una corsa utile pari a 25 mm, una risoluzione idealmente infinita ed una ripetibilità delle letture che può fornire un errore massimo di 0,01 mm (= 10 μm).



Figura 208 - Un trasduttore potenziometrico (modello *GEFRAN PZ67-S*) come quelli installati sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate

Insieme con questi strumenti sono presenti otto termocoppie di tipo t (di cui due all'esterno). Quest'ultime inviano, con la stessa scansione temporale, i valori della temperatura, che sono da tenere in considerazione assieme a quelli degli spostamenti.

Su alcune fessure sono incollate anche le basette per le letture con il deformometro removibile (sia a base 250 mm che a base 140 mm). In questo caso però questa tipologia di strumento viene utilizzata solo come prova o come verifica dei valori ricavati dai trasduttori potenziometrici. Le letture vengono eseguite senza una scansione temporale predefinita.

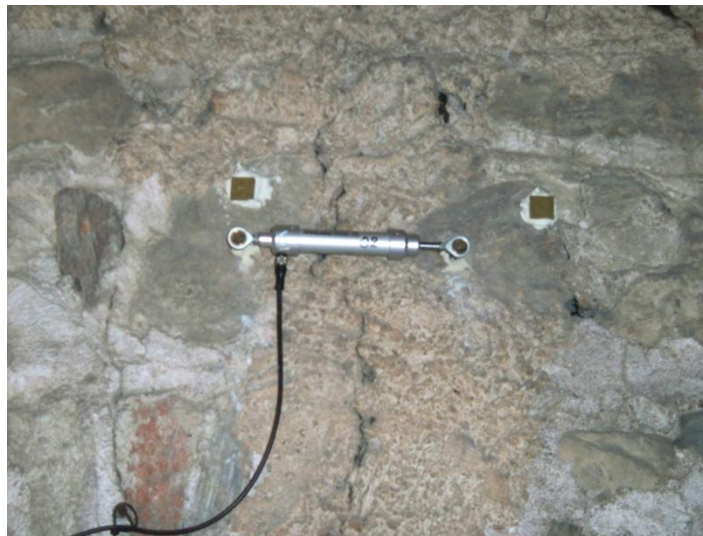


Figura 209 – Un trasduttore potenziometrico (modello GEFTRAN PZ67-S) applicato sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate

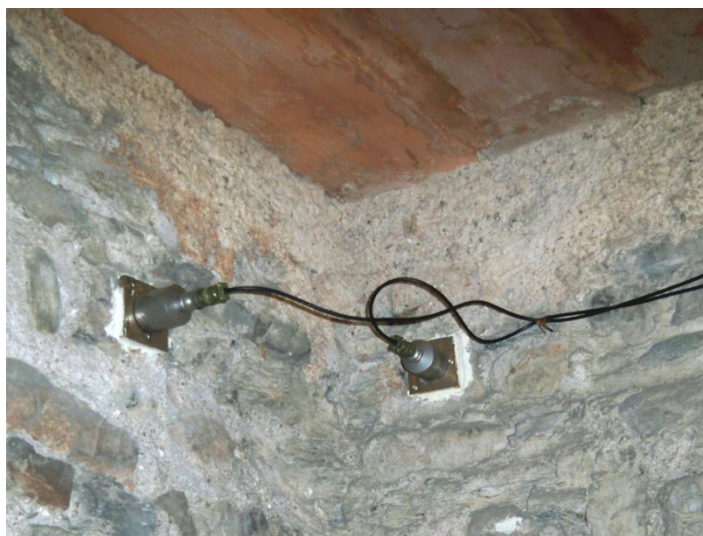


Figura 210 – Servoaccelerometri (monitoraggio dinamico) installati sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate

Nel sistema di monitoraggio sulla torre campanaria di S. Vittore non è stato possibile installare una linea telefonica che potesse permettere di inviare i dati in tempo reale anche a distanza: per questo è necessario che un operatore vada circa una volta alla settimana a “scaricare” i dati dai due computer predisposti a questo.



Figura 211 – I due computer predisposti all’acquisizione dei valori del monitoraggio dinamico (a sinistra) e statico (a destra)

Dai valori del monitoraggio statico e dinamico si ricavano dei grafici sull’andamento di tutte le fessure. Questi grafici devono essere sviluppati in maniera tale da riuscire a fare ragionamenti corretti sia sul breve che sul lungo periodo. Alcuni movimenti infatti, per quanto significativi, non devono preoccupare in quanto sono legati semplicemente a fenomeni stagionali o diurni (dovuti soprattutto alle escursioni termiche). Le tendenze sul lungo periodo invece saranno il vero parametro da cui trarre delle conclusioni sullo stato di salute del campanile.

Come è già stato detto molte volte in questa tesi, un buon monitoraggio può descrivere le condizioni di una struttura se acquisisce e confronta i valori su un periodo di tempo non inferiore ai 18 mesi. Ovviamente se il periodo si potesse prolungare oltre tale soglia migliorerebbe senz’altro la precisione e l’attendibilità delle considerazioni conclusive.

5.3_La prova sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate

La prova sperimentale organizzata sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate è particolarmente utile per ottenere i risultati ricercati nell'ambito di questa tesi. Per indagare le accuratezze di misurazione di tutti gli strumenti (consolidati e sperimentali) del monitoraggio statico è necessario infatti tenere in considerazione tutte le caratteristiche di un manufatto architettonico, come il tessuto murario sul quale applicare gli strumenti o le sue condizioni di accessibilità, insomma di tutti gli aspetti legati alla sua fisicità.

La prova svolta in laboratorio al Politecnico di Milano è stata certamente essenziale per lo studio oggetto di questa tesi, ma si è occupata di una situazione ideale e non reale, perché i movimenti relativi dei due blocchi di calcestruzzo fibrorinforzato erano omogenei lungo la discontinuità (fessura) ed anche perché non sempre capita, come è avvenuto in quel caso, di avere la possibilità di applicare gli strumenti su una superficie omogenea e perfettamente complanare come quella. Molto spesso una muratura è disomogenea e, di conseguenza, sono disomogenei gli sforzi ai quali ogni sua parte è sottoposta ed anche i piccoli movimenti relativi che compie sono diversi a seconda del punto nel quale si effettua la misura, soprattutto in prossimità delle fessure.

Le due prove sono state pertanto entrambe fondamentali proprio perché hanno avuto due scopi leggermente diversi: la prova in laboratorio ha definito in maniera specifica l'accuratezza di misura che ognuno dei metodi presentati può raggiungere; la prova sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate invece, pur ragionando comunque sulle diverse misure degli spostamenti delle sue fessure a confronto, sarà meno assoluta nel definire un dato sull'accuratezza, ma allo stesso tempo potrà discutere anche di tutti gli aspetti pratici legati all'uso di ogni singolo strumento.



Figura 212 - Gli strumenti di misura applicati su una fessura della torre campanaria di S. Vittore



Figura 213 – Le difficoltà di accessibilità del punto in cui si trova una fessura sulla torre campanaria di S. Vittore

E' bene ricordare infatti che l'accuratezza di misura è un parametro di uno strumento molto importante, ma non è l'unico. Ogni strumento deve essere valutato nel suo complesso, considerando tutti gli aspetti positivi e negativi del suo utilizzo. Proprio dalla consapevolezza delle specifiche caratteristiche di ogni metodo di misurazione, ed anche dalla esperienza personale, deriverà poi la scelta pratica del tecnico di adoperare in un certo sito uno strumento piuttosto che un altro.

La muratura antica del campanile di S. Vittore fornisce notevoli spunti in questo senso perché è un oggetto complesso da approcciare in quanto presenta caratteristiche geometriche, materiche e statiche molto particolari.



Figura 214 – La torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate. Si noti la disomogeneità del suo tessuto murario

I metodi oggetto di indagine in questa prova sperimentale saranno:

- Misure con i trasduttori potenziometrici fissi;
- Misure con i deformometri meccanici rimovibili;
- Elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré;
- Analisi delle immagini (mire e griglia di riferimento).

La prova si svolgerà nel corso di due giornate, nella prima delle quali verranno applicati tutti gli strumenti necessari e nella seconda si effettueranno le misure.

Pur inserendosi nell'ambito di un monitoraggio in corso, infatti, le verifiche sulla torre campanaria non hanno come obiettivo la definizione delle tendenze in atto sul campanile e neanche la comprensione del suo stato di conservazione. Anche se i tempi di svolgimento di questa tesi lo avessero permesso, non ci sarebbe stata alcuna ragione di effettuare la campagna di misure nell'arco di un lungo periodo di tempo, cosa che normalmente fa un normale monitoraggio. Quello che interessa invece è soprattutto eseguire con tutti gli strumenti tante letture di uno stesso spostamento e confrontare tra loro i valori che si sono ricavati. In questo senso non è fondamentale conoscere la causa che genera lo spostamento né tantomeno gli effetti che ne potrebbero scaturire.

Dalle operazioni di trasporto e di fissaggio (oltre che dal costo) di strumenti ed accessori si trarranno delle conclusioni generali sulla praticità di ogni singolo metodo di misurazione. Dal confronto tra i valori delle misure si potranno fare delle conclusioni in merito all'accuratezza delle misure di ogni strumento. Si ricorda come in assoluto il metodo di misurazione che fa da riferimento per gli altri sono gli strumenti elettrici (trasduttori potenziometrici in questo caso).

Grazie ai risultati (seppur parziali) del monitoraggio in corso sulla torre campanaria si era a conoscenza del fatto che durante le giornate di sole le fessure esistenti di norma si aprono sull'interno (soprattutto quelle sul lato sud) con un'ampiezza di movimento tra i 50 e i 200 μm circa. Questi movimenti sono dovuti all'escursione termica giornaliera e si ripetono ciclicamente giorno dopo giorno. Pertanto la loro ampiezza non deve preoccupare. Sul lungo periodo è comunque possibile che oltre ai movimenti ciclici se ne sommino altri di natura diversa, che dovranno essere tenuti maggiormente in considerazione per capire le tendenze in atto sul manufatto monitorato. Oltre a questo si era a conoscenza anche del fatto che i fenomeni di apertura delle fessure iniziano presto nella mattina, all'incirca alle ore 8-9, per arrestarsi verso le ore 14-15 e poi invertire lentamente la loro tendenza.

Proprio la preventiva conoscenza dell'ampiezza dei movimenti abituali delle fessure ha fatto sì che venissero esclusi da questa prova i righelli graduati (del tipo Salmoiraghi). Questi strumenti hanno

una precisione di misura troppo bassa per riuscire ad analizzare movimenti di questo tipo. Inoltre la loro esclusione è derivata anche da questioni pratiche di tempo e di spazio utile sulle fessure.

Dopo questi ragionamenti si può capire il perché si sarebbe dovuto attendere una giornata di sole per effettuare la campagna di misure sulla torre campanaria. In giorni durante i quali il sole non irraggia liberamente, infatti, i fenomeni di apertura e chiusura delle fessure diminuiscono in maniera drastica e si attestano su valori molto bassi (pochi micron).

5.3.1_Il primo sopralluogo sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate e la preparazione degli strumenti di misurazione

E' stato concordato di effettuare il primo sopralluogo alla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate in data 04/03/2010. Questa è stata la prima giornata di lavoro utile in sito, ma tutte le operazioni che sono state svolte non devono essere considerate come legate solamente a questo specifico lavoro, bensì dovranno essere comunque contestualizzate all'interno del monitoraggio statico e dinamico che il dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano sta operando sulla torre già a partire dal Dicembre del 2008, e che si è cercato di sintetizzare nel paragrafo 5.2. Le prove sperimentali che si è deciso di effettuare sulla torre utilizzano molte informazioni che derivano proprio dal monitoraggio in corso (ad esempio nella decisione di quali fessure andare ad indagare) ed anche gli strumenti che sono già applicati sulle fessure, accompagnati da questo momento in poi da quelli che sono stati aggiunti per poterli confrontare.

Questa prima giornata ha avuto come fine solamente l'applicazione degli strumenti. Non è stato pensato di poter, già nell'arco di quella sola giornata, acquisire dei dati importanti per lo studio che viene proposto.

La campagna di misura si sarebbe svolta in un'altra giornata ed avrebbe studiato l'apertura (o più in generale i movimenti) di almeno due fessure della torre campanaria nell'arco di tutta una giornata, almeno dalle ore 9 alle ore 16. Le tempistiche del lavoro di tesi hanno infatti obbligato a studiare l'accuratezza dei diversi strumenti sulla base del confronto nella misurazione degli spostamenti nell'arco di una giornata, e non nel corso di molti mesi come deve accadere normalmente per un monitoraggio che voglia fornire tutte le informazioni corrette per conoscere il comportamento di un edificio. Questo aspetto non deve far pensare che lo studio che è stato effettuato sia poco preciso o parziale. Infatti quello che interessa, e che si vuole indagare in questa sede, è il confronto dei valori che emergono dalle misurazioni con i differenti strumenti e non il comportamento generale della torre campanaria. Quello scopo è propriamente quello del monitoraggio in corso, statico e dinamico.

Nel corso anche di una sola giornata una muratura si muove e le fessure che la interessano si muovono anch'esse, aprendosi, chiudendosi o scorrendo. Ovviamente si parla di movimenti relativamente piccoli o molto piccoli: dai valori che sono stati registrati dal monitoraggio in corso sulla torre campanaria si è visto che le fessure più colpite dal fenomeno di apertura possono avere delle oscillazioni superiori ai $150\ \mu\text{m}$ ($= 0.15\ \text{mm}$) nell'arco di una sola giornata. Queste oscillazioni si ripetono quotidianamente e sono dovute alle dilatazioni termiche che avvengono per il riscaldamento superficiale che è causato dall'irraggiamento solare (ovviamente nei giorni in cui questo irraggiamento è presente). Bisogna fare altre considerazioni anche sulle esposizioni solari delle pareti e delle loro fessure: ovviamente il lato più interessato dai fenomeni di dilatazione

termica dovuta all'irraggiamento solare è il lato sud, seguito dai lati ovest ed est che ne sono interessati in maniera leggermente inferiore fino ad arrivare a nord dove il fenomeno non è presente. Questo aspetto ha certamente influenzato la scelta delle due fessure sulle quali si sarebbe incentrata l'indagine ed ha spinto ad optare per due fessure entrambe sul lato sud, una sul quarto livello e l'altra sul quinto. Occorre precisare in questo momento che non è detto che le fessure sul lato meridionale di un edificio siano sempre le più pericolose, semplicemente sono quelle sulle quali le escursioni termiche diurne e l'irraggiamento solare influisce in maniera più significativa. Probabilmente un monitoraggio sulla base di 18 mesi o più porterà ad individuare le fessure più pericolose su altri fronti, ma per misure nell'arco di una sola giornata il lato sud è certamente il più adatto. Va da sé che, per ottimizzare gli sforzi e per rendere più grandi le seppur piccole differenze tra le misurazioni degli spostamenti per la campagna di misure che sarebbe stata svolta di lì a poco, sarebbe stato preferibile scegliere una giornata di sole. Il periodo di Marzo/Aprile è ideale in quanto le escursioni termiche diurne sono in genere piuttosto rilevanti ed il sole, quando è libero di irraggiare, scalda intensamente le superfici esposte.



Figura 215 – La torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate (fronti est e nord)

Sono stati portati in sito gli strumenti necessari per fare la campagna di misure su due fessure. Tutte le fessure più significative presenti sulla torre hanno già applicato un trasduttore potenziometrico collegato ad un modulo *Field Point* che acquisisce automaticamente i segnali lenti in tempo reale. Un computer invece è predisposto per acquisire i dati del monitoraggio dinamico, che utilizza degli accelerometri per imporre degli sforzi noti e studiare il comportamento che questi sforzi inducono sulla torre ed in particolare sulle sue fessure.

Non su tutte le fessure (ma su molte di esse) sono già incollate le basette per la lettura degli spostamenti con il deformometro meccanico digitale (distanza di riferimento tra le basette = 250 mm).



Figura 216 – Una fessura al quarto livello con un trasduttore potenziometrico e le basette per la lettura con il deformometro meccanico digitale già applicati

A parte questi strumenti si sarebbe dovuto aggiungere su entrambe le fessure: un fessurimetro moiré, le mire e la griglia di riferimento per l'analisi delle immagini, le basette per la lettura con il deformometro meccanico digitale con base uguale a 250 mm (se avessimo scelto una delle fessure senza basette applicate ovviamente).

Al quarto livello, quello dove hanno sede i due computer, si è iniziato a ragionare su quali sarebbero state le due fessure più adatte all'indagine che ci si era preposti di fare. La decisione è stata presa tenendo in considerazione l'esposizione e la tendenza ad aprirsi e chiudersi di ognuna delle fessure nell'arco di una giornata, insieme con considerazioni circa l'accessibilità e la possibilità di lavorarci sopra comodamente. I grafici dei dati precedentemente acquisiti sono stati di grande aiuto in questa fase.

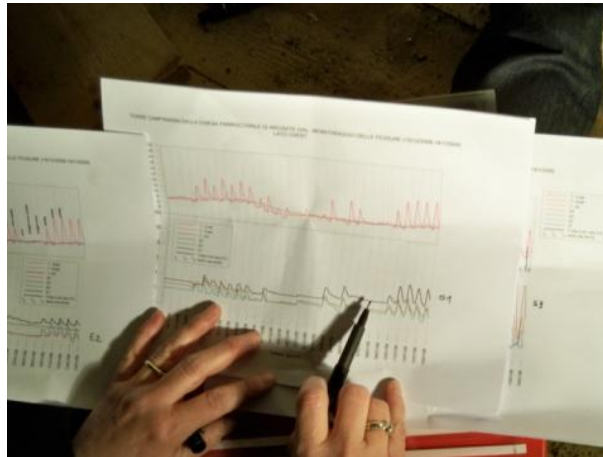


Figura 217 – I grafici degli spostamenti registrati su tutte le fessure monitorate

Alla fine si è optato per le fessure S2 ed S3 (la nomenclatura è la medesima del monitoraggio in corso). Delle due la seconda è in assoluto quella che ha registrato finora i movimenti di apertura e chiusura più ampi a causa dell'irraggiamento solare (anche oltre ai 150 micron), ed è stata scelta anche se è probabilmente una tra le meno accessibili. La prima invece presenta degli spostamenti paragonabili a quelli di altre due o tre fessure sui lato est ed ovest, ma è stata preferita ad esse proprio perché più comoda e più facilmente accessibile. Entrambe le fessure sono sul fronte sud: la S2 è al quarto livello, mentre la S3 è al quinto livello, quello dove è presente l'orologio.



Figure 218 e 219 – La fessura S2 al quarto livello e la fessura S3 al quinto livello evidenziate da un colore rosso

Individuate le due fessure sulle quali applicare i nuovi strumenti di misurazione, ci si è spostati al quinto livello per iniziare il lavoro sulla fessura che è stata chiamata S3. Questa fessura è molto scomoda da raggiungere, ma è stato necessario includerla nello studio. Su di essa è già stato fissato

un trasduttore potenziometrico ed anche le basette per le misure con il deformometro meccanico con base uguale a 250 mm. Oltre a questo sono state agganciate ai due estremi dello strumento elettrico due rondelle sulle quali sono state incise due bollinature a 140 mm di distanza. In questo modo è stata aperta la possibilità di eseguire una lettura ulteriore con un deformometro meccanico a base più piccola.



Figura 220 – Il trasduttore potenziometrico con aggiunte le rondelle e, appena sopra, le basette per la misurazione con il deformometro meccanico a base 250 mm sulla fessura S3

A questo punto è stato possibile iniziare la procedura di fissaggio del fessurimetro moiré. Logicamente è preferibile apporre gli strumenti il più vicino possibile gli uni agli altri. In questo modo si cerca di limitare al massimo le differenze degli spostamenti da misurare che possono essere leggermente diversi tra il ventre e le cuspidi di una fessura. Fortuna vuole che il fessurimetro moiré abbia una lunghezza tale (200 mm) da permettere l’inserimento tra le basette per la lettura con il comparatore meccanico, un paio di centimetri al di sopra del trasduttore potenziometrico. Purtroppo in quel punto i due lati della fessura non sono esattamente complanari. Altre difficoltà derivano anche dal fatto che una muratura antica come quella che compone la torre campanaria è tutt’altro che uniforme, anzi presenta una superficie dissestata. Dati questi presupposti si è reso indispensabile un’abbondante utilizzo di colla che svolgesse la doppia funzione sia di fissaggio vero e proprio che di spessore per portare sullo stesso piano i due elementi (bianco e trasparente) che compongono il fessurimetro moiré. La colla che è stata utilizzata è un mastice solido per marmi insieme con un catalizzatore che inducesse il suo indurimento.

Prima ancora di procedere con l’incollaggio dello strumento però è stata applicata, stando attenti al corretto lato dei componenti, della vaselina nella parte con disegnati i retini con le griglie di cerchi

concentrici che, sovrapponendosi, formano le frange di interferenza. In questo modo è stato più facile tenere ben saldi i due componenti (e di conseguenza i due retini), sia durante l'indurimento della colla che in tutto il periodo successivo di vita utile dello strumento. Se infatti i due componenti si disunissero il disegno delle frange subirebbe delle modifiche che potrebbero distorcere la successiva analisi delle immagini e pertanto il valore dello spostamento che si cerca di trovare. La vaselina ha il doppio merito di far aderire i due componenti e di non impedire l'analisi delle immagini successiva: anche se offusca leggermente i retini il metodo di analisi informatica li individua e li elabora comunque.



Figura 221 – Prove di posizionamento del fessurimetro moiré sulla fessura S3



Figura 222 – Fase di adesione dei due componenti del fessurimetro moiré tramite vaselina



Figure 223 e 224 – Fase di incollaggio del fessurimetro moiré sulla muratura con mastice solido per marmi

Il mastice impiega qualche minuto ad indurirsi completamente e durante tale periodo è necessario tenere saldamente i due componenti del fessurimetro in maniera tale da impedirgli di muoversi. In questa fase si cerca anche di correggere eventuali errori di posizionamento, sia che essi siano di non perfetta complanarità oppure di leggero sfalsamento orizzontale o verticale. Nel caso della fessura S3 ci si è accorti che i due componenti del fessurimetro moiré tendevano a ruotare leggermente facendo scendere verso il basso, seppur di pochissimo, la parte dei retini che avrebbe dovuto mantenersi invece esattamente sovrapposta. Per ovviare a questo problema è bastato esercitare (con un comune cacciavite) una piccola forza dal basso verso l'alto per un paio di minuti. Dopodiché si è constatato il definitivo indurimento del mastice ed il posizionamento dello strumento era di fatto completato. Ulteriori piccoli movimenti non sarebbero stati possibili d'ora in avanti perché il mastice, fuoriuscito attraverso i due piccoli fori che ognuno dei due componenti del fessurimetro presenta, fornisce tutte le garanzie necessarie per una assoluta stabilità nel tempo.



Figura 225 – Ultima fase di assestamento della posizione dei due componenti del fessurimetro moiré sulla fessura S3



Figura 226 – Il fessurimetro moiré definitivamente incollato sulla fessura S3

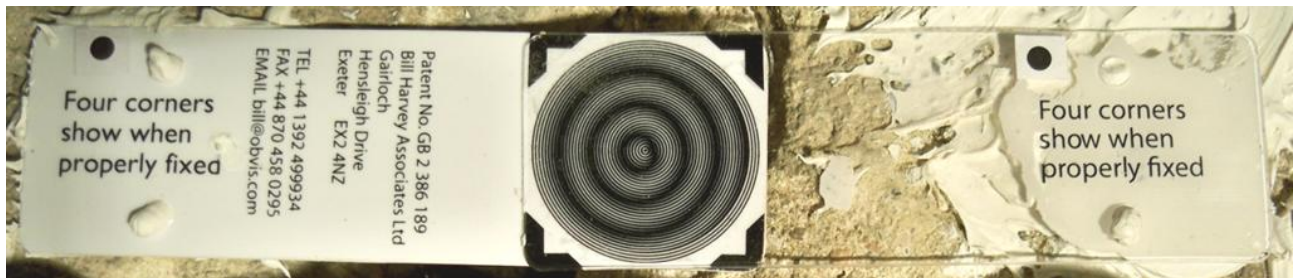


Figura 227 – Vista frontale del fessurimetro moiré poco dopo l'incollaggio

Qui sopra si può vedere una prima immagine del fessurimetro moiré poco dopo il definitivo indurimento del mastice. Si può notare subito, anche senza l'ausilio dell'elaborazione informatica delle immagini, che le frange dei due componenti formano un disegno complessivo che non corrisponde a quello della sovrapposizione perfetta. Sembrerebbe infatti che il posizionamento sia stato, anche se di poco, leggermente sbagliato: i due componenti sono un po' troppo vicini l'uno all'altro. Ad ogni modo si possono demandare alla successiva fase di elaborazione ulteriori considerazioni in merito a ciò. Questo aspetto comunque non dovrebbe preoccupare, perché, in linea di principio, non si altera l'attendibilità delle misure che interessa acquisire, dal momento che l'obiettivo è quello di acquisire una sequenza di fotogrammi analoghi che, una volta analizzati, possano informare circa lo spostamento relativo che accade su questa fessura a causa delle dilatazioni termiche. Il dato che si andrà poi a discutere sarà la differenza tra gli spostamenti rilevati sui vari fotogrammi e dunque dovrebbe importare poco se il fessurimetro non parte ad inizio giornata dalla posizione dello spostamento nullo. Lo spostamento avvenuto prima dell'inizio di quella giornata (compreso anche quello dovuto all'imprecisione al momento dell'incollaggio) influenzerà in maniera identica lo spostamento calcolato su tutti i fotogrammi e si annullerà nel momento in cui si esegue la differenza.

Terminato il fissaggio del primo strumento si è potuto cominciare a svolgere le procedure di incollaggio di tutto l'occorrente per il metodo che è stato chiamato "analisi delle immagini": una griglia di riferimento e delle mire. Il metodo è già stato ampiamente trattato nei capitoli precedenti di questa tesi (paragrafi 3.2 e 4.6). In poche parole comunque si ricorda che per arrivare al dato dello spostamento relativo si analizzano tutti i fotogrammi acquisiti con un programma informatico. Quest'ultimo utilizza la griglia per dare delle coordinate alle mire, dalle cui differenze si ricavano gli spostamenti relativi. Sulle fessure della torre campanaria, così come nella prova in laboratorio presso il Politecnico di Milano, sono stati utilizzati, tanto per la griglia che per le mire, una stampa di pallini neri su sfondo bianco. I pallini neri, che svolgono il ruolo di mire, questa volta sono stati stampati su carta adesiva e sono stati tagliati ed incollati ad uno ad uno (alla fine si è arrivati ad un totale di quattordici mire sulla fessura S3 e a dieci per la S2).

Per prima cosa è stato incollato il foglio della griglia su un supporto di latta sul quale si sarebbe potuto applicare lo stesso mastice che è stato utilizzato per i fessurimetri moiré per fissarlo sulla muratura. Subito si è stabilita la posizione migliore sulla fessura per la griglia di riferimento. Si ricorda che non è strettamente necessario applicarla a cavallo della fessura, ma che è comunque preferibile posizionarla in maniera tale che stia abbastanza vicino alle mire in modo tale da semplificare lo scatto da eseguire successivamente, che deve comprendere necessariamente tutti gli elementi.



Figura 228 – Prove di posizionamento della griglia di riferimento

La griglia è stata incollata poco sopra il fessurimetro a cavallo della fessura, anche perché le mire sarebbero state incollate molto vicino (in alcuni casi anche sopra) gli strumenti che erano già fissati. Per aiutare la stabilità della griglia nel corso dell'indurimento del mastice è stato fissato un piccolo chiodo che è stato poi rimosso appena esaurito il periodo necessario al suo completamento.



Figura 229 – Il taglio delle mire ad una ad una

Le mire erano preparate su delle striscioline adesive ed occorreva tagliarle ad una ad una. E' stato stabilito quante mire incollare sulla fessura S3: cinque coppie di mire nella parte inferiore alla griglia. Di queste una sul fessurimetro moiré, una sulle basette per la lettura con il deformometro meccanico a base 250 mm, due sulle rondelle aggiunte alle estremità del trasduttore potenziometrico e l'ultima direttamente sulla muratura. Applicare delle mire, facendogli formare basi di lunghezza diversa, direttamente sugli strumenti avrebbe permesso poi di avere degli spunti ulteriori per il confronto tra le accuratezze dei diversi metodi.

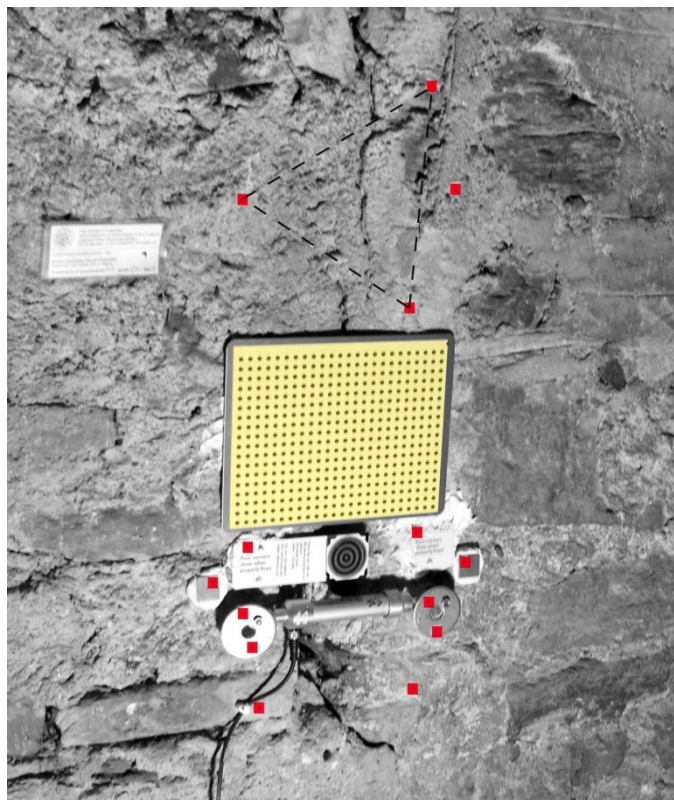


Figura 230 – La posizione delle 14 mire (in rosso) e delle griglia di riferimento (in giallo) sulla fessura S3

Per le quattro mire applicate sopra la griglia di riferimento occorre fare un discorso a parte. Si può notare nella figura della pagina precedente come siano state disegnate delle linee tratteggiate che congiungono tre delle quattro mire. In effetti queste tre mire (delle quali due da una parte della fessura e la restante sulla parte opposta) vogliono disegnare proprio un triangolo equilatero. In questo modo è possibile verificare allo stesso tempo l'apertura e lo scorrimento parallelo della fessura, come viene spiegato in maniera specifica nel paragrafo 2.2.3.5 di questa stessa tesi.

Per posizionare correttamente le mire, viene utilizzata una particolare mascherina di plastica trasparente a geometria triangolare che consente di trovare sempre alla stessa distanza i punti di misura.

La scelta del posizionamento delle mire deve tenere in considerazione aspetti sia caratteristici della lesione che si intende prendere in esame, che della superficie sulla quale si vogliono applicare le basi di rilevamento: il lato "morto" del triangolo deve essere grossomodo parallelo all'andamento della fessura. La quarta mira è stata posizionata per consentire di calcolare i movimenti di apertura e chiusura come per le coppie di cui si è parlato poco fa. In questo caso serve anche come verifica dei valori ricavati dal metodo del triangolo equilatero.



Figura 231 – La fessura S3 una volta ultimate le operazioni di fissaggio di tutti gli strumenti

A questo punto sono finite le operazioni di fissaggio degli strumenti su questa fessura (S3). Prima di scendere al livello sottostante per ripetere gli stessi passaggi sulla fessura S2, si è voluto eseguire una prima lettura con il deformometro meccanico digitale a base 250 mm. Questa operazione non è stata altro che una verifica della possibilità di misurazione su quelle basette con lo strumento che era in dotazione. Il suo utilizzo vero e proprio inizierà nella prossima giornata ad Arcisate, quella nella quale si prenderanno le misure reali sulle fessure della torre campanaria.

Si scende così al quarto livello, quello dove stazionano i due computer predisposti all'acquisizione dei dati che arrivano dai trasduttori elettrici per quanto riguarda il monitoraggio statico e dagli accelerometri per il monitoraggio dinamico. A questo livello sono stati più semplici i movimenti e tutte le operazioni che sono state eseguite. Inoltre il grado di illuminazione naturale è ottimale e non è stato necessario utilizzare il riflettore che invece è stato di notevole aiuto per il quinto livello. Anzi, prima di scattare le ultime fotografie (quelle utili per l'analisi delle immagini e per l'elaborazione dei fessurimetri moiré) è stato posizionato uno scatolone sulla finestra in maniera tale da limitare l'apporto di luce frontale rispetto al punto di presa dei fotogrammi.

La fessura S2 presenta fenomeni di apertura e di chiusura, a fronte delle escursioni termiche giornaliere, paragonabili a quelli di altre fessure presenti sui lati ovest o est in altri livelli, ma è stata preferita a quelle per questioni di praticità e di accessibilità. Inoltre la fessura in questione (come d'altronde anche la fessura S3), oltre al trasduttore potenziometrico, vede già fissate anche le basette per la lettura con il deformometro meccanico a distanza 250 mm. In questo caso non sono presenti le due rondelle fissate sulle estremità del trasduttore con impressi due bollinature per le misurazioni attraverso l'altro deformometro (quello con base 140 mm).



Figura 232 – La fessura S2 prima di iniziare le operazioni di fissaggio degli altri strumenti

Questa volta si è deciso di iniziare dalla verifica della possibilità di fissare in un'altra maniera la griglia di riferimento per l'analisi delle immagini sulla fessura. Proprio questo fissaggio ha rappresentato una delle poche differenze tra le operazioni eseguite su questa fessura (S2) e quelle trattate nella prima parte del paragrafo (sulla fessura S3). La griglia cartacea è stata incollata anche in questo caso su un supporto metallico, il quale però, al posto di essere direttamente incollato sulla muratura, è stato forato con un trapano nei due angoli superiori. In questi fori si sono fatte passare delle lunghe viti che sarebbero state incollate, sempre con lo stesso mastice solido per marmi, nelle cavità che la massa muraria presentava appena al di sotto dell'apertura. Successivamente, una volta indurito il mastice, si sarebbe potuta stabilizzare la posizione della griglia di riferimento con delle rondelle che scorrono proprio sulle viti. È stato introdotto questo elemento di novità per verificare se è possibile (ed anche se è agevole) fissare permanentemente solo un supporto (ad esempio le viti) su ogni fessura e non la griglia. Utilizzando questa tecnica sarebbe possibile preparare e disporre poi di una sola griglia di riferimento in grado di essere fissata di volta in volta sulla fessura che si va a fotografare. Dopo aver verificato la possibilità di fare questo tentativo, è stato messo in attesa l'incollaggio della griglia di riferimento e si è proceduto con il fissaggio del fessurimetro moiré.



Figure 233 e 234 – Lo scorrimento delle rondelline sulle viti. A destra una prima prova di posizionamento nelle cavità che la fessura S2 presenta poco sotto l'apertura

Per quanto riguarda il fissaggio del fessurimetro moiré non ci sono state rilevanti difformità tra le operazioni svolte su questa fessura rispetto a quelle svolte poco prima sulla fessura al livello superiore. Dapprima è stata spalmata la vaselina sui due componenti nella porzione che sarebbe andata a sovrapporsi; successivamente è stato usato ancora lo stesso mastice per fare in modo che i due componenti venissero posizionati sullo stesso piano ed allo stesso tempo si incollassero alla muratura. Anche qui, dopo qualche minuto di attenzione e di correzione dei movimenti che il fessurimetro avrebbe potuto fare con il mastice non ancora indurito, è stato constatato e verificato il definitivo fissaggio dello strumento. Come nel caso precedente l'allineamento dei due retini non è

perfetto, ma è già stato spiegato come questo fatto non rappresenti di per sé un problema nella successiva valutazione degli spostamenti relativi della fessura.



Figura 235 – L'applicazione della vaselina sui due componenti del fessurimetro moiré



Figura 236 – La fase di incollaggio del fessurimetro moiré sulla muratura attraverso mastice solido per marmi



Figura 237 – Il fessurimetro moiré incollato sulla fessura S2

Il passaggio successivo ha previsto l'incollaggio delle viti che avrebbero funzionato come supporto della griglia di riferimento per l'analisi delle immagini. Avendo utilizzato ancora lo stesso mastice si era a conoscenza del tempo di presa che sarebbe dovuto passare per l'indurimento definitivo.



Figura 238 – La griglia di riferimento fissata sulle viti incollate nelle cavità della muratura

Prima di procedere con il posizionamento delle mire, è stata effettuata un'altra operazione: l'applicazione di due grosse rondelle avvitate alle estremità del trasduttore potenziometrico, del tutto simili a quelle che si trovavano già applicate sulla fessura al livello superiore. Su questi due nuovi elementi sono state preventivamente fatte due bollinature che avrebbero impropriamente svolto il ruolo di basette dove infilare i tastatori per la lettura con il deformometro meccanico (base 140 mm). Le due bollinature sulle rondelle sono state incise grossolanamente, perché tanto, successivamente, ovvero nel momento del fissaggio delle rondelle sulle estremità del trasduttore, c'era la possibilità di farle ruotare per fare in modo che la distanza tra i due punti incisi corrispondesse esattamente a 140 mm. A quel punto si sarebbe potuto stringere il fissaggio, fissandolo così nel tempo.



Figura 239 – Il fissaggio della prima rondella sull'estremità destra del trasduttore potenziometrico



Figura 240 – Verifica e correzione della posizione delle rondelle con una dima

Utilizzando direttamente le due estremità del trasduttore potenziometrico si è garantita la possibilità di eseguire una lettura, con il deformometro meccanico, esattamente alla stessa altezza dove il trasduttore registra gli impulsi elettrici (anche se su un piano differente). Facendo così il dato del comparatore sarà direttamente confrontabile con quello elettrico e le considerazioni circa la sua accuratezza diverranno particolarmente interessanti. Dopo aver avvitato definitivamente le rondelle sul trasduttore, è stato tarato lo strumento con la dima di azzeramento. Subito dopo è stata effettuata una prima misurazione di prova dello strumento.



Figure 241 e 242 – Taratura del deformometro meccanico a base 140 mm e prima misurazione di prova

A questo punto mancava soltanto l'incollaggio delle mire per completare il quadro degli strumenti che ci si è impegnati ad applicare su questa fessura (S2). La linea guida del loro posizionamento è stata la medesima spiegata precedentemente: abbondare con le coppie di mire; utilizzare per

l'incollaggio, quando possibile, dei punti sugli strumenti che diano degli argomenti ulteriori in fase di confronto dei valori degli spostamenti. Sono state incollate su questa fessura in tutto dieci mire, delle quali: una coppia direttamente sulla muratura; una coppia sui due componenti del fessurimetro moiré; una coppia sulle basette per la lettura con il deformometro meccanico (base 250 mm); le restanti due coppie sulle rondelle fissate alle estremità del trasduttore potenziometrico.



Figure 243 e 244 – Fase di incollaggio delle mire per il metodo dell'analisi delle immagini

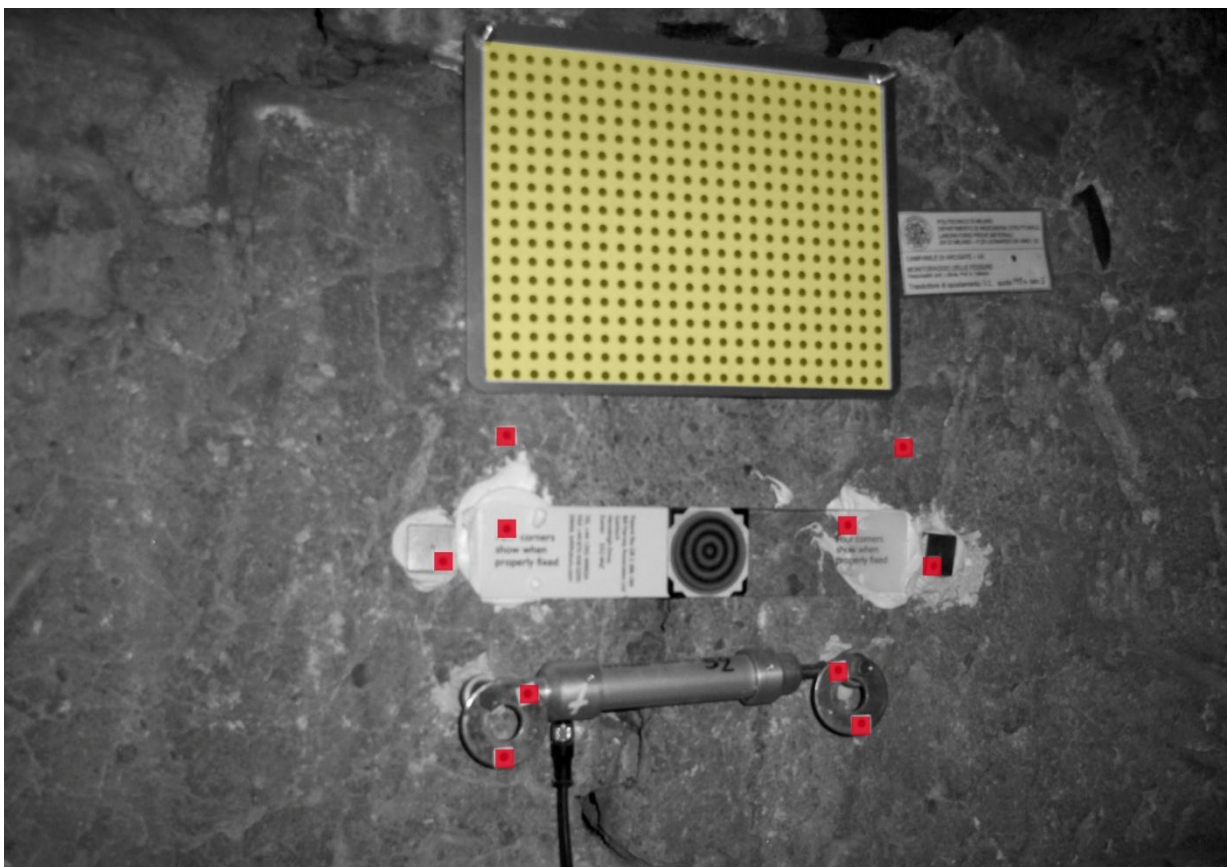


Figura 245 – Le cinque coppie di mire (in rosso) e la griglia di riferimento (in giallo) per il metodo dell'analisi delle immagini sulla fessura S2

Il compito della prima giornata alla torre campanaria delle chiesa S. Vittore di Arcisate è stato quasi ultimato: mancava ancora di scattare gli ultimi fotogrammi delle fessure in maniera più rigorosa, in modo tale, una volta tornati a Milano, di poter fare una prima verifica sia per il metodo dell'analisi delle immagini che per l'elaborazione delle frange dei fessurimetri moiré. Non sarebbe stato utilizzato alcun cavalletto per stabilizzare la posizione delle macchine fotografiche in questa fase. Si sarebbe solo fatto in modo di essere in una posizione frontale ad una distanza accettabile, per fare in modo che ogni fotografia avesse al suo interno la griglia di riferimento, il fessurimetro moiré e le mire. Per quanto riguarda il grado di illuminazione si sono verificate due situazioni contrapposte, come spiegato in precedenza, in quanto sulla fessura S2 al quarto livello è stato necessario porre uno scatolone nell'apertura sovrastante in maniera tale da ridurre l'apporto di luce frontale rispetto al punto di presa delle fotografie; al livello superiore invece si è dovuto accendere un riflettore per avere il giusto livello di illuminazione (a questo piano non è presente alcuna apertura).

Prima di iniziare la serie finale di fotografie è stata aggiunta un'ultima mira sulla fessura S2 che ha chiuso, anche su questa, il triangolo equilatero per il metodo che è stato discusso precedentemente.



Figura 246 – Tutti gli strumenti applicati sulla fessura S2 (con l'aggiunta in basso dell'ultima mira)



Figura 247 – Dettaglio del fessurimetro moiré incollato sulla fessura S2



Figura 248 – Tutti gli strumenti applicati sulla fessura S3



Figura 249 – Dettaglio del fessurimetro moiré incollato sulla fessura S3

In chiusura di questo paragrafo si vuole accennare al fatto che è stato deciso di non applicare, sulle due fessure prese come oggetto di studio sulla torre campanaria, i fessurimetri piani (del tipo Salmoiraghi). Questa decisione è derivata dalla loro provata scarsa accuratezza, che, anche grazie alla prova in laboratorio, si è compreso fosse nell'ordine del millimetro. Per studiare l'andamento delle fessure nell'arco di una giornata questi strumenti non sarebbero stati utili, in quanto si sa che le massime aperture attese sono attestabili attorno ai 150 micron (0.15 mm) a fronte dell'accuratezza che è stata appena citata. Non si sarebbe potuto leggere alcuno spostamento dunque e si è evitato perciò di applicare quello strumento, anche per ottimizzare i tempi di lavoro e lo spazio disponibile sulle due fessure.

5.3.2_Il secondo sopralluogo sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate e la descrizione della campagna di misure

E' stato concordato di eseguire la campagna di misure sulla torre campanaria di S. Vittore di Arcisate (VA) in data 09/04/2010. La scelta di tale giorno è stata fatta anche sulla base delle previsioni metereologiche, in quanto le misurazioni sui fenomeni di apertura e di chiusura delle fessure da monitorare sarebbero state più interessanti se effettuate durante un giorno di sole. Proprio il sole infatti, scaldando superficialmente la muratura della torre, incrementa notevolmente i movimenti delle fessure durante il giorno e dà modo di prendere misure sensibilmente diverse nel corso di un solo giorno. Grazie al monitoraggio statico e dinamico che il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano sta già effettuando dall'Ottobre 2008, si sapeva che in giornate di sole con una buona escursione termica diurna si potevano ottenere movimenti delle fessure anche superiori ai $150 \mu\text{m}$, ovvero 0.15 mm. Lo scopo di questa giornata è stato quello di misurare, attraverso i diversi strumenti di monitoraggio presentati in questa tesi, i movimenti di due fessure della torre campanaria (S2 e S3) e di mettere a confronto tra loro i risultati ottenuti per trarre delle conclusioni circa l'accuratezza di questi strumenti. Non interessava invece fare considerazioni circa i movimenti delle fessure sul lungo periodo né, in generale, sullo stato di conservazione della torre.

La conoscenza dei dati del monitoraggio statico ha suggerito anche il fatto di iniziare la campagna di misure presto nella mattinata. Grossomodo si era a conoscenza del fatto che i movimenti delle fessure iniziassero circa verso le ore 8 per raggiungere il loro picco circa alle ore 14 e poi invertire lentamente la loro tendenza già dal primo pomeriggio. Sulla base di questo è stata raggiunta la torre già prima delle ore 9.

Gli strumenti di misurazione che si sarebbero utilizzati sono già stati trattati nel paragrafo precedente, ma è utile ricordarli anche qui. Già applicati sulle fessure c'erano:

- I trasduttori potenziometrici;
- I fessurimetri moiré;
- La griglia di riferimento e le mire per l'analisi delle immagini;
- Le basette per le misure con i deformometri (sia a base 140 mm che a base 250 mm).

Oltre a questi strumenti sono stati portati in sito:

- Due macchine fotografiche, un cavalletto ed un riflettore;

- Tre deformometri meccanici digitali (due a base 250 mm ed uno a base 140 mm) e le basette di uno dei due comparatori a base 250 mm che non erano ancora state applicate sulle fessure;
- Una colla a presa rapida per il fissaggio delle nuove basette del deformometro meccanico digitale;
- Dei foglietti di carta sui quali scrivere l’orario di ciascuna fotografia, che sarebbero stati applicati sulla muratura per essere fotografati assieme a fessurimetri e mire.



Figure 250 e 251 – Le due fessure oggetto di monitoraggio e tutti gli strumenti prima di iniziare le misure

La giornata serviva interamente alla acquisizione delle misure (dirette e indirette). Prime di iniziare però bisognava eseguire alcune piccole operazioni. Innanzitutto bisognava incollare le basette per uno dei due deformometri a base 250 mm. Ogni strumento infatti (e di deformometri ne sono stati portati tre in sito) presenta dei tastatori diversi e dunque occorreva verificare ognuno di essi con le proprie basette specifiche, in modo tale da mettere a confronto valori ottenuti con le prestazioni massime ottenibili da quello strumento.



Figura 252 – Particolare dell’incollaggio della nuova basetta in sovrapposizione a quella precedentemente incollata alla muratura

Le nuove basette sono state incollate direttamente sulla muratura sulla fessura S2, mentre sono state incollate a loro volta sulle altre basette già applicate per quanto riguarda la fessura S3.

Prima di iniziare le misure bisognava decidere la sequenza di operazioni da svolgere ripetitivamente ed anche la scansione temporale delle misure sulle due fessure. Le fessure S2 e S3 sono a due livelli differenti (rispettivamente quarto e quinto) e le scale tra un livello e l'altro non sono agevoli da percorrere (così come tutte le operazioni da fare al quinto livell), che ospita l'orologio. Dopo una rapida discussione è stato deciso quanto segue:

- La macchina fotografica *Canon EOS 300D Digital* sarebbe stata utilizzata fissata sul cavalletto al quinto livello;
- Il riflettore sarebbe stato usato anch'esso al quinto livello, in quanto non c'è nessuna apertura;
- La macchina fotografica digitale *Kodak V1273* sarebbe stata usata al quarto livello da posizione variabile;
- I tre deformometri sarebbero stati utilizzati per la fessura S3 al quinto livello e solo uno di essi (*Huggenberger EDU II*) sarebbe stato portato al livello inferiore per ogni misura;
- La scansione temporale più adatta delle misurazioni sarebbe stata quella di una misura ogni 30 minuti anche se i trasduttori potenziometrici mandano valori una volta ogni ora;



Figure 253 e 254 – Il quinto livello. Si notino le difficili situazioni di movimento e la posizione degli strumenti accessori come riflettore, cavalletto e macchina fotografica

Non restava altro da decidere. Era stata precedentemente preparata anche una tabella che ospitasse ordinatamente i dati delle letture effettuate con i vari deformometri. Oltre a quelli sarebbero stati riportati i valori della temperatura e le condizioni metereologiche all'esterno. Le prime misure sarebbero state effettuate alle ore 9.30.



Figura 255 – Il deformometro Controls a base 140 mm sulla fessura S3. La lettura viene eseguita sulle bollinature fatte sulle rondelle fissate agli estremi del trasduttore potenziometrico



Figure 256 e 257 – I due deformometri a base 250 mm. A sinistra il modello Huggenberger EDU; a destra il modello Huggenberger EDU II

Per avere a disposizione una buona quantità di valori da confrontare sarebbe stato ragionevole misurare con quella scansione temporale almeno fino alle 16, orario in cui sarebbe stata effettuata la quattordicesima misura. D'altronde il confronto degli strumenti della prova in laboratorio è stato principalmente effettuato sulla base di quindici spostamenti, ovvero fino a quando hanno fornito valori anche i trasduttori induttivi (spostamento di 2 mm). A quell'ora i movimenti delle due fessure avrebbero già dovuto vedere un'inversione della tendenza dei dati.

Le operazioni di misurazione si sono svolte senza particolari problemi. Alla fine della giornata si sono ottenuti direttamente i valori delle letture con i deformometri ed anche quelli trasmessi dagli strumenti elettrici, una volta scaricati dal computer che li registra. I dati dei due metodi che sfruttano le immagini fotografiche digitali si ottengono indirettamente dalla successiva elaborazione delle stesse attraverso i due programmi informatici già presentati in questa tesi.

5.3.2.1_I valori ottenuti con i trasduttori potenziometrici

Così come per la descrizione della prova svolta in laboratorio nel dipartimento di Ingegneria Strutturale presso il Politecnico di Milano, anche per le misurazioni prese ad Arcisate si discutono in primo luogo i dati che derivano dagli strumenti elettrici, che, come si è già avuto modo di spiegare nel paragrafo 5.2, sono in questo caso trasduttori potenziometrici e non induttivi. Questa decisione deriva dal fatto che questa tipologia di strumento è senza dubbio la più affidabile tra quelli a disposizione. Pertanto, così come è avvenuto per la prova in laboratorio, i valori ricavati dagli strumenti elettrici saranno poi il termine di paragone per il confronto tra gli altri metodi di cui si sta indagando l'accuratezza, anche se sulle fessure della torre campanaria potrebbero agire maggiori fenomeni di rotazione che possono influenzare il confronto dal momento che i diversi strumenti sono posizionati in punti diversi della fessura, anche se molto vicini.

Per questi strumenti non si è stata necessaria alcuna operazione di preparazione della prova in quanto i trasduttori potenziometrici sono già in funzione sulla torre campanaria di S. Vittore di Arcisate sin dall'inizio del monitoraggio, ovvero già dall'Ottobre 2008.



Figura 258 – Il trasduttore potenziometrico Gefran PZ67-S fissato sulla fessura S3 ad Arcisate

Gli impulsi elettrici dei trasduttori vengono trasmessi automaticamente ed in tempo reale ad una centralina che si chiama *Field Point* una volta ogni ora (le misure per gli altri strumenti sono avvenute invece una ogni mezz'ora). Per evitare di effettuare le misure in concomitanza con il suono delle

campane, che potrebbero influire sul dato con le vibrazioni che inducono su tutta la struttura, i momenti di acquisizione sono stati posti alla mezz'ora e non sull'ora piena (9,30 – 10,30 – 11,30 - ...)

I valori dei trasduttori potenziometrici vengono acquisiti e registrati, ma a causa della mancanza di una linea telefonica da cui trasmettere i dati, è necessario però che un operatore si rechi sul luogo di tanto in tanto per “scaricare” i dati da un computer predisposto a questo compito.

Per questo strumento, insomma, non è stato indispensabile adoperarsi in maniera particolare: alla fine della giornata sulla torre (9/04/2010) sono stati scaricati i valori acquisiti automaticamente nel corso della giornata dal computer predisposto per i segnali lenti al quarto livello (ve n'è un altro predisposto per i segnali veloci).

Di seguito si riporta una tabella che contiene i valori degli spostamenti registrati sulle due fessure (S2 e S3) già espressi in dati metrici (mm). La correzione per la costante di calibrazione dello strumento è stata fatta automaticamente dal sistema.

	<i>T interna</i> (°C)	<i>Trasduttore</i> <i>S2 (mm)</i>	<i>Trasduttore</i> <i>S3 (mm)</i>
9,30	13,5	0	0
10,30	13,5	-0,001	0,015
11,30	14,5	-0,001	0,040
12,30	15,5	-0,001	0,082
13,30	16	0,006	0,113
14,30	16	0,014	0,144
15,30	16	0,019	0,166
16,30	16	0,026	0,175

Tabella 24 – I valori ottenuti dai trasduttori potenziometrici Gefran PZ67-S sulle fessure S2 e S3

5.3.2.2_I valori delle letture con i deformometri meccanici

La prima tabella che viene riportata in questo paragrafo fa riferimento ai deformometri meccanici digitali ed include:

- L'orario della misura eseguita;
- La temperatura registrata all'interno della torre al quinto livello (°C);
- L'unica misura eseguita con il deformometro *Huggenberger EDU II* fatta sulla fessura *S2* al livello inferiore (mm);
- I valori delle tre letture eseguite con i tre diversi deformometri sulla fessura *S3* (mm).

Ora	T interna (°C)	<i>Hugg. EDU II</i>	<i>Controls</i>	<i>Hugg. EDU</i>	<i>Hugg. EDU II</i>
		<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S3</i>	<i>S3</i>
9.30	13,5	-	<i>0,501</i>	-0,289	-
10.00	13,5	0,004	<i>0,523</i>	-0,280	-0,032
10.30	13,5	0,002	<i>0,548</i>	-0,265	-0,003
11.00	14	0,045	<i>0,532</i>	-0,239	0,010
11.30	14,5	0,079	<i>0,553</i>	-0,212	0,031
12.00	15	0,111	<i>0,607</i>	-0,175	0,066
12.30	15,5	0,138	<i>0,614</i>	-0,156	0,126
13.00	15,5	0,157	<i>0,622</i>	-0,139	0,136
13.30	16	0,179	<i>0,650</i>	-0,117	0,149
14.00	16	0,213	<i>0,648</i>	-0,106	0,166
14.30	16	0,215	<i>0,646</i>	-0,095	0,183
15.00	16	0,191	<i>0,651</i>	-0,087	0,186
15.30	16	0,187	<i>0,658</i>	-0,079	0,191
16.00	16	0,169	<i>0,668</i>	-0,074	0,191

Tabella 25 – I valori ottenuti attraverso i tre deformometri a disposizione. Sulla fessura *S2* è stata eseguita una sola lettura, mentre sulla fessura *S3* i tre strumenti sono anche a confronto tra di loro. Il deformometro *Controls* ha una base di misura di 140 mm, mentre gli altri due di 250 mm

Di seguito viene riproposta la medesima tabella sostituendo i valori delle singole letture con le differenze che intercorrono tra ogni valore ed il primo di riferimento, che diventa lo zero di partenza. In questo modo viene evidenziata l'ampiezza dell'apertura delle fessure.

I valori delle ore 9.30 vengono esclusi perché in seguito a quella lettura uno dei deformometri meccanici è stato nuovamente azzerato e pertanto non si aveva la totale garanzia delle stesse condizioni per le diverse misure. Per questa ragione verranno escluse dal confronto anche le misure ottenute con gli altri strumenti per quell'orario.

Ora	T interna (°C)	Δ Hugg. EDU II S2	Δ Controls S3	Δ Hugg. EDU S3	Δ Hugg. EDU II S3
9.30	13,5	-	(0,501)	(-0,289)	-
10.00	13,5	0	0	0	0
10.30	13,5	-0,002	+0,025	+0,015	+0,029
11.00	14	+0,041	+0,029	+0,041	+0,042
11.30	14,5	+0,075	+0,030	+0,068	+0,063
12.00	15	+0,107	+0,074	+0,105	+0,098
12.30	15,5	+0,134	+0,091	+0,124	+0,158
13.00	15,5	+0,153	+0,099	+0,141	+0,168
13.30	16	+0,175	+0,127	+0,163	+0,181
14.00	16	+0,209	+0,125	+0,174	+0,198
14.30	16	+0,211	+0,123	+0,185	+0,215
15.00	16	+0,187	+0,128	+0,193	+0,218
15.30	16	+0,183	+0,135	+0,201	+0,223
16.00	16	+0,165	+0,145	+0,206	+0,223

Tabella 26 – Gli spostamenti relativi ottenuti attraverso i tre deformometri a disposizione. Sulla fessura S2 è stata eseguita una sola lettura, mentre sulla fessura S3 i tre strumenti sono anche a confronto tra di loro. Il deformometro Controls ha una base di misura di 140 mm, mentre gli altri due di 250 mm

5.3.2.3_I valori ricavati dall'analisi dei fessurimetri moiré

L'elaborazione delle immagini dei retini del fessurimetro moiré è stata effettuata solamente per quanto riguarda la fessura S3. Questo è avvenuto sulla base della conoscenza della scarsa attendibilità delle misure effettuate sull'altra fessura, ma si darà maggiori informazioni su questo aspetto in chiusura di questo capitolo.

La procedura di acquisizione dei fotogrammi è stata già ampiamente discussa così come la scansione temporale degli stessi ed anche la loro elaborazione. Si ricorda solo che gli scatti sono stati eseguiti a due a due e l'elaborazione è stata fatta per tutte le immagini a disposizione. Nella prossima tabella i valori degli spostamenti che vengono riportati sono già una media dei due fotogrammi della stessa ora. Le differenze tra i due fotogrammi analoghi erano comunque molto basse (intorno a 0,001 mm). La tabella precisamente contiene:

- L'orario di acquisizione dei fotogrammi;
- La temperatura interna (°C);
- La media dei valori degli spostamenti relativi ottenuti attraverso l'elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré (mm);

Ora	T interna (°C)	Sp. Relativo
9.30	13,5	(-0,008)
10.00	13,5	0
10.30	13,5	0,011
11.00	14	0,033
11.30	14,5	0,061
12.00	15	0,083
12.30	15,5	0,106
13.00	15,5	0,107
13.30	16	0,133
14.00	16	0,13
14.30	16	0,144
15.00	16	0,149
15.30	16	0,159
16.00	16	0,148

Tabella 27 – I valori ottenuti dall'elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré per la fessura S3

5.3.2.4_ I valori ricavati dall'analisi delle immagini

La fase di preparazione di questo metodo è già stata trattata in maniera specifica nel paragrafo 5.3.2, sia per quanto riguarda la fessura S2 al quarto livello che per la S3 al quinto. In questo momento interessa descrivere solamente i risultati ottenuti attraverso l'elaborazione delle immagini acquisite in sito. Si ricorda solamente che per la fessura S2 è stata utilizzata una macchina fotografica da posizione variabile, mentre al livello superiore un'altra macchina fotografica ha preso i fotogrammi posta su un cavalletto, ovvero da posizione fissa.

Prima di riportare i dati degli spostamenti delle due fessure è necessario chiarire quali coppie di mire (ovvero quali basi di misura) sono state utilizzate nell'analisi delle immagini.

Per quanto riguarda la fessura S3 le basi di misura utilizzate sono tre, e si possono riconoscere nel disegno qui sotto.

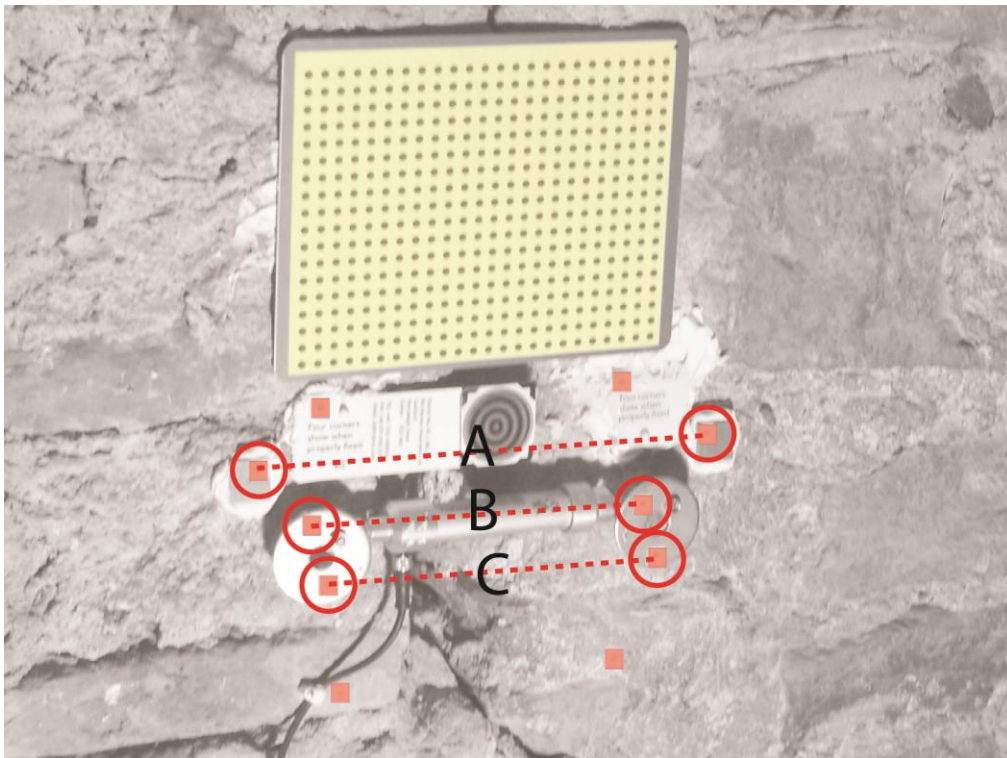


Figura 259 – Individuazione delle tre coppie di mire che sono state utilizzate come basi nell'analisi delle immagini

Ogni mezz'ora sono state scattate due fotografie. Entrambe sono state elaborate e la tabella dei valori che viene riportata nella prossima pagine tiene conto della media matematica tra i due. E' bene specificare come i valori dei fotogrammi omologhi non variasse che di pochi micron.

Di seguito si propone la tabella con i dati degli spostamenti della fessura S3 ottenuti attraverso il metodo dell'analisi delle immagini. I valori inseriti sono:

- Ora dello scatto;
- Temperatura registrata all'interno della torre campanaria al quinto livello (°C);
- Media dei due valori ottenuti dagli scatti alla stessa ora sulla base A (mm);
- Media dei due valori ottenuti dagli scatti alla stessa ora sulla base B (mm);
- Media dei due valori ottenuti dagli scatti alla stessa ora sulla base C (mm);

Ora	T interna (°C)	Base A (mm)	Base B (mm)	Base C (mm)
9.30	13,5	(-0,005)	(-0,008)	(-0,009)
10.00	13,5	0	0	0
10.30	13,5	0,007	0,002	-0,005
11.00	14	0,036	0,022	0,014
11.30	14,5	0,064	0,045	0,033
12.00	15	0,082	0,063	0,060
12.30	15,5	0,118	0,100	0,092
13.00	15,5	0,129	0,105	0,104
13.30	16	0,147	0,119	0,121
14.00	16	0,160	0,145	0,131
14.30	16	0,177	0,153	0,147
15.00	16	0,179	0,164	0,161
15.30	16	0,198	0,184	0,177
16.00	16	0,169	0,157	0,161

Tabella 28 – I valori degli spostamenti relativi ottenuti attraverso l'analisi di tre coppie di mire sulla fessura S3

I valori della fessura S2 non vengono riportati per il motivo che viene spiegato in chiusura di questo capitolo.

5.4 Conclusioni sulle verifiche ad Arcisate

Si è affermato dal principio come questa seconda prova, organizzata sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate, avesse come obiettivo principalmente la verifica degli svantaggi e dei vantaggi della reale applicazione degli strumenti di misura su un vero manufatto architettonico. La disomogeneità del tessuto murario della torre campanaria non ha facilitato di certo il compito di applicare gli strumenti ed è stata in questo senso un vero e proprio banco di prova. Il confronto delle misure ottenute in questa prospettiva ha un'importanza relativamente minore rispetto alla prova organizzata in laboratorio in condizioni pressoché ideali.

Si sono dovuti tenere in considerazione e risolvere problemi di complanarità tra i due lembi della fessura, problemi di accessibilità dei punti di misura, condizioni disagiati di illuminazione ed anche movimenti differenziali su una stessa fessura. Proprio a causa di questi movimenti differenziali, ed anche delle piccole rotazioni che si generano su una fessura di questo tipo, non si fanno conclusioni specifiche sulle accuratezze dei diversi metodi di misurazione. Quello scopo è stato quello della prova organizzata in laboratorio al Politecnico di Milano.

Pertanto è stato utile applicare gli strumenti su due fessure ed anche eseguire su di esse le misure, ma non avrebbe senso spendere troppo tempo sul confronto dei dati ottenuti. In questo paragrafo comunque si rapportano tra loro tutti i valori delle misure ottenute per quanto riguarda la fessura S3. I metodi di misurazione ai quali si fa riferimento sono:

- Trasduttori potenziometrici;
- Deformometro *Controls* (base 140 mm);
- Deformometro *Huggenberger EDU* (base 250 mm);
- Deformometro *Huggenberger EDU II* (base 250 mm);
- Analisi delle immagini a posizione fissa (base A);
- Analisi delle immagini a posizione fissa (base B);
- Analisi delle immagini a posizione fissa (base C);
- Elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré.

Tutti questi valori sono riportati in un grafico nella prossima pagina. In prossimità del grafico si può vedere un'immagine che rappresenta chiaramente tutti i punti dove sono avvenute le misurazioni, specificando anche l'ampiezza delle loro basi di misura. Successivamente si spiega anche il motivo di questo tipo di rappresentazione.

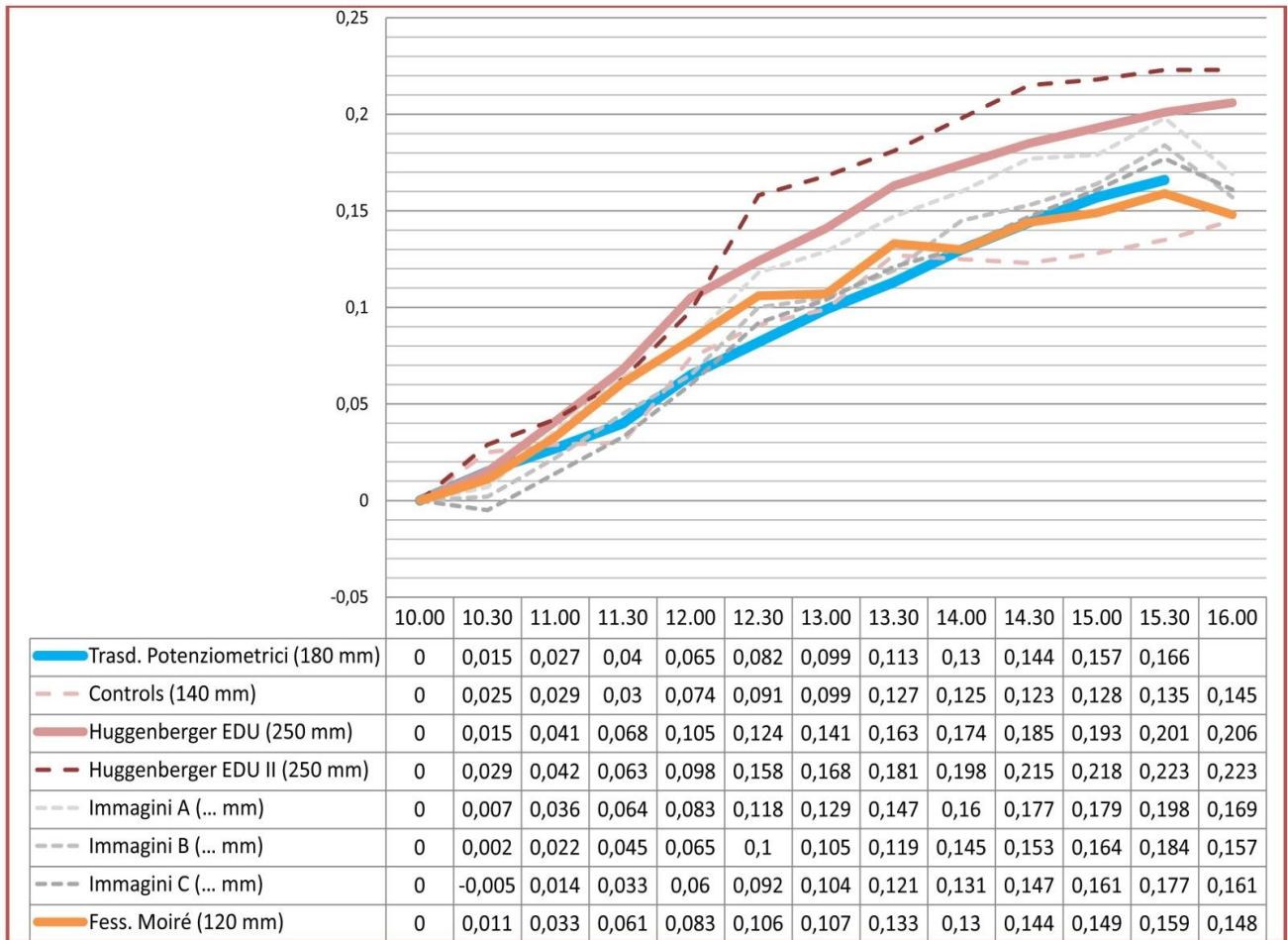


Figura 260 – I valori degli spostamenti relativi ottenuti attraverso tutti i diversi metodi sulla fessura S3 della torre campanaria. Si noti come sembra esserci una relazione tra ampiezza della base di misura e valori misurati

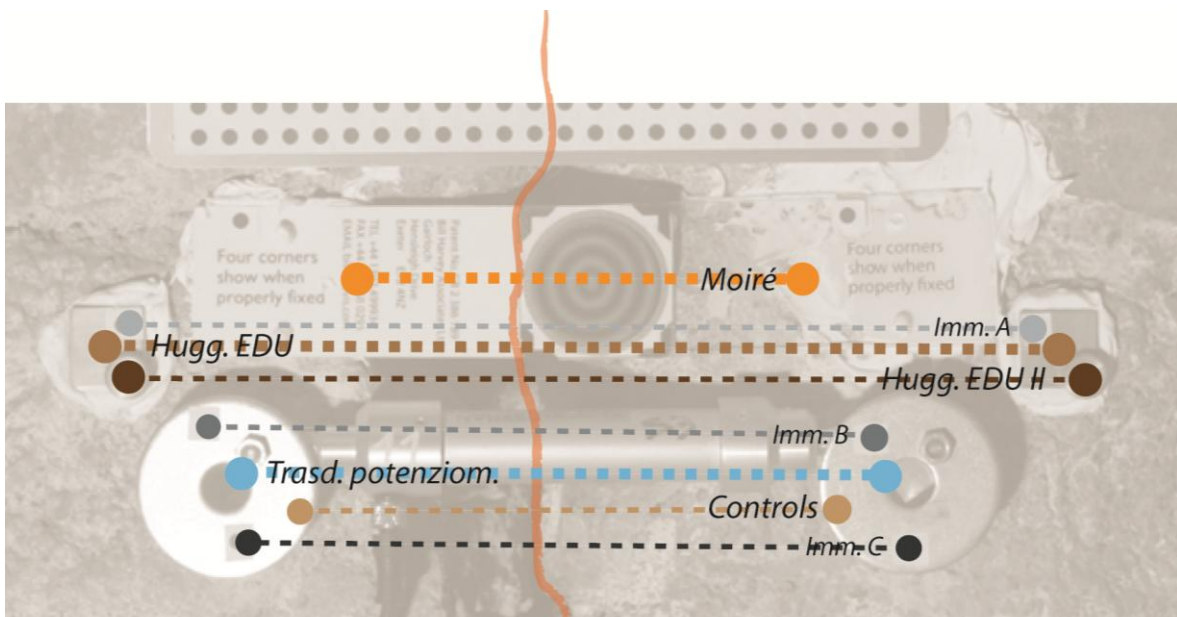


Figura 261 – Le basi di misura di ogni strumento sulla fessura S3 della torre campanaria

Le curve che rappresentano i valori ottenuti con i diversi metodi di misurazione hanno un andamento comunque paragonabile tra di loro, anche se le differenze sono notevolmente maggiori rispetto a quelle ottenute nella prova in laboratorio. In maniera particolare si ha avuto la sensazione che le differenze fossero in qualche modo legate all'ampiezza della base di misura: ad una base maggiore corrisponde un valore dello spostamento relativo maggiore. Questo è il motivo per il quale è stata affiancata al grafico quella figura con le basi di misura evidenziate. Questo aspetto potrebbe essere espressione di un piccolo fenomeno di rotazione avvenuto assieme all'apertura della fessura, dovuta alla dilatazione termica causata dall'irraggiamento solare.

Certamente si possono comunque fare dei ragionamenti sulle accuratezze delle misure, ma non ci sono le basi per poter fare delle deduzioni assolute. Ad esempio sembra strana l'ampia differenza che spesso si trova tra i due valori dei deformometri meccanici a base 250 mm, soprattutto tenendo conto del fatto che le piastrine di uno sono state incollate su quelle dell'altro. Si potrebbe avere conferma da questo, anche in luce delle prove in laboratorio, che il modello *Huggenberger EDU II* abbia presentato una qualche anomalia nel funzionamento che genera un problema di ripetibilità delle misure (come ha confermato già una prova specificatamente dedicata a questo aspetto, 4.3.3).

Avendo chiarito le caratteristiche e gli obiettivi di questa prova sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate, si può capire come sia stato preferibile omettere alcuni risultati sulla fessura S2, che con tutta probabilità, è interessata da fenomeni di rotazioni e spostamenti disomogenei maggiori di quelli della fessura S3.

Tuttavia si possono fare delle considerazioni in merito alla applicazione degli strumenti ed anche al loro funzionamento in sito. Più precisamente si può concludere che:

- Se una fessura ha i due lembi su piani diversi, questo può causare delle difficoltà per l'applicazione dei fessurimetri moiré e, in maniera minore, per le letture con i deformometri meccanici;
- Le murature sono solidi disomogenei e sono disomogenei anche i movimenti che le interessano. Pertanto sarebbe preferibile monitorare una fessura su più di un punto per rilevare anche le piccole rotazioni che avvengono (anche se questo rappresenta un incremento dei costi);
- Gli strumenti elettrici prevedono costi e tempi di applicazione maggiori rispetto agli altri strumenti (fori con il trapano);
- Gli strumenti elettrici hanno il vantaggio di poter acquisire le misure in maniera automatica ed anche di poterle inviare a distanza (se si può installare un *modem*), mentre

i deformometri meccanici necessitano di un operatore che vada in sito ad eseguire la lettura;

- I fessurimetri moiré e le analisi delle immagini hanno la potenzialità di poter evitare anch'essi che un tecnico si rechi ogni volta in sito. Questo nel caso in cui si demandasse a qualcuno di eseguire le fotografie (non è richiesta nessuna particolare abilità);
- I deformometri meccanici possono causare problemi anche per quanto riguarda l'accessibilità del punto della fessurazione. Una fessura esterna o una fessura in un angolo scomodo deve essere raggiunta per ogni lettura (e l'operatore deve eseguirla con una certa tranquillità);
- Andare ad eseguire le letture con gli strumenti removibili può causare dei problemi logistici (avvisare gli utenti ed averli presenti ad esempio);
- Nel complesso misurare con i deformometri, con i fessurimetri o con l'analisi delle immagini prevede un costo complessivo minore rispetto ai sistemi con gli strumenti elettrici;
- Gli strumenti elettrici necessitano di un collegamento costante alla rete elettrica.

In merito allo sviluppo del fessurimetro moiré si può affermare che alcune modifiche potrebbero generare delle migliorie per il suo utilizzo che viene proposto in questa tesi, più precisamente si potrebbe:

- Dotare il componente trasparente, che si deve sovrapporre a quello bianco, di uno spessore tale che risulti agevole porli in posizione complanare;
- Aumentare lo spessore di entrambi i componenti del fessurimetro per dotarli di maggiore rigidità e scongiurare il fenomeno dell'imbarcamento che anch'esso rende difficile la complanarità dei due retini;
- Unire i due componenti del fessurimetro con una piccola quantità di nastro adesivo da rimuovere ad incollaggio terminato;
- Utilizzare della glicerina o altre sostanze perfettamente trasparenti per garantire l'adesione dei due retini (senza offuscare il disegno che essi formano).

CONCLUSIONI

Il lavoro presentato in questa tesi ha avuto come oggetto i fenomeni di fessurazione delle masse murarie ed i metodi di misurazione dei loro spostamenti. La finalità di questa indagine è stata principalmente quella di sviluppare e sperimentare due nuovi metodi di misurazione, uno che elabora le frange di interferenza generate dalla sovrapposizione dei retini dei fessurimetri moiré e l'altro che svolge una particolare analisi delle immagini digitali. Il confronto con altri metodi già consolidati ha evidenziato le loro potenzialità ed i loro difetti. È stato verificato con particolare attenzione il loro grado di accuratezza allo stato attuale.

Già nella trattazione delle caratteristiche dei metodi consolidati del monitoraggio statico si ha avuto modo di prendere una posizione chiara per quanto riguarda le spie di vetro e le spie di malta, e più precisamente si può affermare che:

- Le spie di vetro e di malta sono da considerarsi strumenti solamente qualitativi, perché non sono in grado di dare indicazioni né sull'ampiezza né sulla tipologia dei movimenti in atto, dal momento che possono rompersi anche solo per motivazioni non strutturali, come ad esempio per i movimenti dovuti alle cicliche dilatazioni termiche dei materiali. Il loro utilizzo pertanto è fortemente sconsigliato.

Durante la prova in laboratorio è emerso chiaramente che:

- L'accuratezza delle misure che forniscono i fessurimetri piani è insufficiente, in quanto si attesta attorno a un millimetro (e non al mezzo millimetro come viene dichiarato dalla ditta che li produce). Questa conclusione però non deve fare in modo che strumento in questione venga totalmente messo da parte. Si potrebbe utilizzare un fessurimetro piano come base di riferimento grossolana in tutte quelle situazioni poco preoccupanti, che non sembrano necessitare di uno studio particolarmente preciso, finalizzato a comprendere la tipologia del moto in atto sulla fessura. Con un fessurimetro applicato si può semplicemente capire, dopo un certo periodo di tempo, se la fessura è in stato di quiete o se è invece in movimento. Un altro tipo di utilizzo di questo strumento che si può prevedere è quello di supporto alle letture con altri metodi che presentano un'accuratezza maggiore ma hanno un fondo scala molto piccolo (trasduttori induttivi).

Avendo trattato preliminarmente questi due metodi di misurazione, che con evidenza presentano un'accuratezza troppo bassa per poter essere considerati degli strumenti adatti allo studio dei movimenti delle fessure, si può iniziare a ragionare sulle differenti caratteristiche degli altri metodi presi in considerazione nel corso di questa tesi, ognuno dei quali può rappresentare in maniera adeguata spostamenti dell'ordine del centesimo di millimetro, ordine di grandezza sufficiente per studiare i movimenti delle fessure.

I metodi a cui si fa riferimento sono:

- Strumenti elettrici (trasduttori induttivi e trasduttori potenziometrici);
- Deformometri meccanici;
- Elaborazione dei fessurimetri moiré;
- Analisi delle immagini.

Il confronto di questi metodi di misurazione comincia da considerazioni in merito alle loro caratteristiche fisiche ed al loro funzionamento. Soprattutto grazie alla prova organizzata sulla torre campanaria di S. Vittore ad Arcisate, si sono potute fare delle considerazioni circa i vantaggi e gli svantaggi durante l'installazione e la vita utile di ognuno di questi quattro metodi di misurazione. Più precisamente si può affermare che:

- Gli strumenti elettrici prevedono costi e tempi di applicazione maggiori rispetto agli altri strumenti (in più bisogna eseguire fori con il trapano);
- Gli strumenti elettrici necessitano di un collegamento costante alla rete elettrica;
- Gli strumenti elettrici hanno il vantaggio di poter acquisire le misure in maniera automatica ed anche di poterle inviare a distanza (se si può installare un *modem*), mentre i deformometri meccanici necessitano di un operatore che vada in sito ad eseguire la lettura;
- I fessurimetri moiré e le analisi delle immagini hanno la potenzialità di poter evitare anch'essi che un tecnico si rechi ogni volta in sito. Questo nel caso in cui si demandasse a qualcuno di eseguire le fotografie (non è richiesta nessuna particolare abilità);
- I deformometri meccanici possono causare problemi anche per quanto riguarda l'accessibilità del punto della fessurazione. Una fessura esterna o una fessura in un angolo scomodo deve essere raggiunta per ogni lettura (e l'operatore deve eseguirla con una certa tranquillità);
- Andare ad eseguire le letture con i deformometri meccanici può causare dei problemi logistici (avvisare gli utenti ed averli presenti ad esempio);

- Se una fessura ha i due lembi su piani diversi, questo può causare delle difficoltà per l'applicazione dei fessurimetri moiré e, in maniera minore, per le letture con i deformometri meccanici;
- Le murature sono solidi disomogenei e sono disomogenei anche i movimenti che le interessano. Pertanto sarebbe preferibile monitorare una fessura su più di un punto per rilevare anche le piccole rotazioni che avvengono (anche se questo rappresenta un incremento dei costi);

Avendo trattato le caratteristiche dell'installazione e del funzionamento di tutti i diversi metodi di misurazione, si può passare a questo punto alla discussione degli aspetti emersi durante la prova svolta in laboratorio presso il Politecnico di Milano. Più precisamente si può affermare che:

- I fondi scala di tutti gli strumenti, tranne i trasduttori induttivi utilizzati (del tipo *W1ELA/0-2*), sono adeguati allo studio dei movimenti che normalmente si verificano sulle fessure;
- I trasduttori induttivi utilizzati nella prova hanno un fondo scala piccolo (± 2 mm) e pertanto è consigliabile utilizzare insieme con essi altri strumenti con un fondo scala maggiore;
- Le risoluzioni degli strumenti verificati è sempre adeguata (0,001 mm), tranne che per i fessurimetri piani (0,5 mm);
- I tempi di elaborazione delle immagini e dei retini dei fessurimetri moiré sono accettabili e possono essere ulteriormente ridotti in futuro;
- L'accuratezza dei tre principali metodi confrontati con gli strumenti elettrici (deformometri meccanici, elaborazione dei retini dei fessurimetri moiré, analisi delle immagini) è, allo stato attuale, migliore di ± 0.01 mm, e per questo è adatta allo studio dei movimenti di una fessura;
- L'accuratezza del deformometro utilizzato nella prova (*Huggenberger EDU II*) è risultata inferiore alle aspettative ($\pm 0,02$ mm), ma è stato verificato che si tratta di una anomalia del singolo strumento;
- L'analisi delle immagini eseguite da posizione variabile hanno un'accuratezza inferiore alle analoghe fatte da posizione fissa (fenomeno probabilmente legato soprattutto alla minore risoluzione di quei fotogrammi);
- L'elaborazione dei retini del fessurimetro moiré risente in maniera minore della risoluzione delle immagini in quanto elabora il disegno di interferenza delle frange, che amplifica i piccoli spostamenti dei retini.

Alla luce dei risultati di entrambe le prove svolte nell'ambito di questa tesi, si possono proporre delle modifiche specifiche per quanto riguarda il fessurimetro moiré. Queste modifiche tendono alla semplificazione tanto della loro installazione quanto della loro elaborazione informatica. Più precisamente si potrebbe:

- Dotare il componente trasparente, che si deve sovrapporre a quello bianco, di uno spessore tale che risulti agevole porre i retini in posizione complanare;
- Aumentare lo spessore di entrambi i componenti del fessurimetro per dotarli di maggiore rigidità e scongiurare il fenomeno dell'imbarcamento che anch'esso rende difficile la complanarità dei due retini;
- Unire i due componenti del fessurimetro con una piccola quantità di nastro adesivo da rimuovere ad incollaggio terminato;
- Utilizzare della glicerina o altre sostanze perfettamente trasparenti per garantire l'adesione dei due retini senza offuscare il disegno che essi formano;
- Modificare i segni angolari (*marker*) in cerchi o altre forme che agevolino la loro individuazione e la loro elaborazione informatica per il ritrovamento del baricentro dei due retini;
- Aumentare la larghezza dei due componenti per riuscire a dotare il fessurimetro di una zona di contorno bianca aggiuntiva (oltre ai *marker*) che agevoli anch'essa l'elaborazione delle immagini rendendo sempre facilmente riconoscibile dal programma la zona dei retini.

In ultima istanza si propone un quadro riassuntivo di tutte le caratteristiche appena citate. Nell'ultima tabella per ogni strumento di misurazione utilizzato si inserisce:

- La base di misura (mm);
- Il fondo scala (mm);
- La risoluzione (mm);
- Il costo (€);
- Una valutazione sui costi complessivi di un monitoraggio con quello strumento (Basso, Medio, Alto, Molto Alto);
- Se è riutilizzabile su più monitoraggi;
- Se è removibile;
- Una valutazione sul tempo necessario alla sua installazione (Basso, Medio, Alto, Molto Alto);

- Una valutazione sul tempo necessario alla sua elaborazione (Nulla, Basso, Medio, Alto, Molto Alto);
- Il valore dell'accuratezza ottenuto attraverso le prove in laboratorio presso il Politecnico di Milano (mm);
- Il valore della ripetibilità delle misurazioni (mm).

	Trasd. Induttivo	Deform. EDU	Deform. EDU II	Salmoiraghi	Moiré	Imm. fisse	Imm. variabile
Base di misura	50 mm	250 mm	250* mm	150 mm	150 mm	Variabile	Variabile
Fondo scala	± 2 mm	± 5 mm	± 6 mm	± 20 mm	± 5 mm**	-	-
Risoluzione	Pot. Infinita	0,001 mm	0,001 mm	0,1 mm	Risoluz. macchina fotografica	Risoluz. macchina fotografica	Risoluz. macchina fotografica
Costo	~ 200 €	~ 2000 €	~ 3000 €	~ 19 €	~ 15 € + ~ 150 € (macch. fotogr.)	~ 600 € (macch. fotogr.)	~ 150 € (macch. fotogr.)
Costi complessivi	Alti	Medi	Medi	Molto bassi	Bassi	Bassi	Bassi
Riutilizzabile	sì	sì	sì	no	no	sì	sì
Removibile	no	sì	sì	no	no	no	no
T installazione	Alto	Medio	Medio	Basso	Medio	Medio	Medio
T elaborazione	Nulla	Nulla	Nulla	Nulla	Medio	Basso	Basso
Accuratezza	Pot. Infinita	~ ± 0,003 mm	~ ± 0,020 mm	~ ± 0,5 mm	~ ± 0,004 mm***	~ ± 0,008 mm***	~ ± 0,030 mm***
Ripetibilità	~ ± 0,001 mm	~ ± 0,002 mm	~ ± 0,020 mm	-	~ ± 0,001 mm***	~ ± 0,001 mm***	~ ± 0,010 mm***

Tabella 29 – Riassunto delle caratteristiche di tutti gli strumenti utilizzati nella prova in laboratorio.

*= Base di misura modificabile (200/150/100/50 mm)

**= Attualmente le approssimazioni delle formule di analisi fanno innalzare l'errore dopo quella soglia

***= Allo stato attuale verificato in laboratorio

Il giudizio complessivo sui due nuovi metodi di misurazione degli spostamenti delle fessure è molto positivo. Il dato circa la loro accuratezza si è attestato su valori che rendono possibile da subito un loro utilizzo pratico. Un'ulteriore miglioramento dell'accuratezza si potrà certamente verificare nel breve periodo, con l'utilizzo di macchine fotografiche con risoluzioni migliori per l'analisi delle immagini e con il perfezionamento dello strumento e del programma di elaborazione per i fessurimetri moiré, anche se non è poi così necessario raggiungere valori molto più raffinati di quelli attuali.

Bibliografia

- Anzani A., Binda L., Il comportamento a lungo termine delle murature storiche: evoluzione del quadro fessurativo come effetto visibile del danno, in *Crolli e affidabilità delle strutture civili*, a cura di Colajanni P., Muscolino G., Ricciardi G., Palermo, Dario Flaccovio editore, pagg. 239-240, 2007
- Baratta A., Cennano C., Corbi I., Manutenzione e sorveglianza programmata per il controllo dell'affidabilità delle strutture, in *Crolli e affidabilità delle strutture civili*, a cura di Colajanni P., Muscolino G., Ricciardi G., Palermo, Dario Flaccovio editore, pagg. 301-312, 2007
- Bertoldi, Marra, *Metodologia di indagine per la diagnosi di antiche torri in muratura: il campanile del Duomo di Monza e il Torrazzo di Cremona*, tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2005
- Binda L., *Ricerca volta a stabilire le condizioni statiche e il comportamento meccanico della muratura del Campanile del Duomo di Cremona*, Relazione finale, Contratto Consiglio della Chiesa Cattedrale di Cremona, Cremona, 1999
- Binda L., Tongini Folli R., Mirabella Roberti G., *Survey and investigation for the diagnosis of damaged masonry structures: the Torrazzo of Cremona*, 12th Int. Brick/Block Masonry Conf., Madrid, 2000
- Binda L., G. Cardani, *Il comportamento meccanico della muratura*, in Corso di Consolidamento degli edifici storici, Milano, 2003
- Binda L., Cardani G., , Relazione sul monitoraggio statico del quadro fessurativo. Periodo di controllo Ottobre 2007 – Aprile 2009, *Valutazione del danno della torre dei Masserano*, Milano, pagg. 1-25, 2009
- Brigante M., D'Urso M. G., Prevenzione e controllo dei dissesti strutturali con tecniche di monitoraggio di sorveglianza, in *Crolli e affidabilità delle strutture civili*, a cura di Colajanni P., Muscolino G., Ricciardi G., Palermo, Dario Flaccovio editore, pagg. 337-348, 2007
- Calzuola F., a cura di, *Sisto Mastrodicasa : scritti e lavori*, Perugia, Benucci, 1984
- Condoleo P., *Il Torrazzo di Cremona: valutazione delle condizioni strutturali mediante indagini in situ e monitoraggio strutturale*, tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2003
- Croci G., *Progettazione strutturale e consolidamento delle costruzioni*, Milano, Hoepli, 1982
- Croci G., *Conservazione e Restauro strutturale dei beni architettonici*, Torino, UTET, 2001

- Defez A., *Il consolidamento degli edifici*, 3° edizione, Napoli, Liguori, 1998
- Doebelin E. O., *Strumenti e metodi di misura*, edizione italiana a cura di Cigada A., Gasparetto M., 2° edizione, Milano, McGraw-Hill, 2008
- Feiffer C., *Il progetto di conservazione*, 4° edizione, Milano, Franco Angeli, 1991
- Garavaglia E., Anzani A., Binda L., Applicazione di un modello probabilistico al comportamento dipendente dal tempo delle murature storiche, in *Crolli e affidabilità delle strutture civili*, a cura di Colajanni P., Muscolino G., Ricciardi G., Palermo, Dario Flaccovio editore, pagg. 239-240, 2007
- Harvey B., *Moirè and other optical techniques for measurement of movement in structures*, 2004
- Macchi G., *Monitoring and diagnosis of monumental structures*, in corso Comett Monitoraggio e indagini non distruttive di strutture ambientali, Pavia, 1992
- Mastrodicasa S., *Dissesti statici delle strutture edilizie*, 9° edizione, Milano, Hoepli, 1993
- Negri S., *Studio dello stato di danneggiamento della torre campanaria della chiesa di S. Vittore di Arcisate*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2007
- Ornellese M., Lazzari L., Pedefferri P., Monitoraggio della corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato precompresso, in *Crolli e affidabilità delle strutture civili*, a cura di Colajanni P., Muscolino G., Ricciardi G., Palermo, Dario Flaccovio editore, pagg. 827-838, 2007
- Park Y. C., Kim S. W., Determination of two-dimensional planar displacement by moiré fringes of concentric-circle gratings, in *Applied optics*, Corea del Sud, Optical Society of America, Vol. 33, n. 22, pagg. 5171-5176, 1994
- Riva S., *Approccio alla diagnosi strutturale: i quadri fessurativi*, tesi di laurea, Politecnico di Milano, 200x
- Rossi P. P., Rossi C., , Surveillance and monitoring of ancient structures: recent developments, *Structural analysis of historical construction II*, Barcellona, pagg. 163-178, 1997
- Saracino M.T., *Il Torrazzo e il suo restauro*, Cremona, Banca Popolare di Cremona, 1972
- Tongini Folli R., *Il comportamento meccanico nel tempo di edifici massivi : evoluzione storico-costruttiva, diagnosi, studio sperimentale e numerico*, tesi di dottorato, Politecnico di Milano, 2003
- Wang T.P., Bediones D., Allen M.G., Recent Advances in Temperature sensor, in *Advances in instrumentation and control*, n.50, 1950
- Yen K. S., Ratnam M. M., 2-D crack growth measurement using circular rating moiré fringes and pattern matching, in *Structural control and health monitoring*, published online in Wiley InterScience, 2009