

POLITECNICO DI TORINO



Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Il monitoraggio strutturale
tra stato dell'arte ed innovazione:
applicazione del sistema a fibra ottica
dello stadio Olimpico Grande Torino**

Relatore

Prof. Fabio MANZONE

Candidato

Claudio SANGARI

MARZO 2022

Sommario

L'affidabilità delle strutture e la salvaguardia del costruito sono temi dal ruolo determinante nel campo dell'ingegneria civile così come nei riguardi dell'opinione pubblica. Il patrimonio esistente che circonda l'uomo si presenta variegato e fragile per le caratteristiche intrinseche e per l'ambiente in cui si iscrive. Questi elementi si riscontrano e vengono sottolineati quando si ha a che fare con strutture speciali, per costituzione e per pubblica utilità; è il caso degli stadi da calcio, su cui la presente trattazione si incentra. Più nello specifico, l'attenzione viene posta su quella nutrita cerchia di impianti italiani sorti in epoca fascista e soggetti in varie fasi della loro vita a interventi di rifunzionalizzazione e ammodernamento, i quali hanno spesso significato l'integrazione di intere componenti strutturali, nella fattispecie le opere di copertura, come accaduto per l'Olimpico Grande Torino, archetipo della presente Tesi.

L'analisi storico-critica, oltre ad evidenziare lo stravolgimento statico e nel comportamento strutturale causato da un passato travagliato, segnala la diretta esigenza di cura del manufatto che si traduce nella necessità di una attività capillare di manutenzione. Lo strumento di risposta a tale esigenza è interpretato dal monitoraggio strutturale e dalle specifiche pratiche dello SHM, specializzate nella tecnica di identificazione dinamica della struttura. La trattazione sviluppa la prima fase del monitoraggio dinamico, rappresentata dalla pianificazione del sistema di monitoraggio dello stadio Olimpico, e tratta la sua implementazione tramite tecnologie innovative, su tutta la fibra ottica. Le considerazioni di pianificazione trovano riferimento rigoroso nell'analisi dinamica modale e nei calcoli strutturali complessivi di supporto, i quali consentono di soddisfare il prerequisito fondamentale di conoscenza dell'opera per l'impostazione del sistema.

Attraverso lo studio dell'articolazione del sistema si mira a sostenere la Tesi avanzata, la quale riguarda l'applicabilità pratica, l'utilità e le potenzialità della soluzione di monitoraggio espressa nella trattazione.

La presente Tesi di Laurea consta materialmente di n.2 parti, mediante le quali si vuole complessivamente avvalorare l'importanza del monitoraggio e il ruolo dell'innovazione, che trovano riscontro pratico nel caso studio dell'Olimpico. La prima parte tratta controllo e monitoraggio come espressioni e metodi di diagnostica strutturale, approfondendo aspetti prettamente teorici di varia natura; dallo *stato dell'arte* si passa alla seconda parte, riguardante l'*innovazione* in materia di monitoraggio, concetti che trovano applicazione negli studi sull'Olimpico.

Esistono diverse chiavi di lettura per questo elaborato e questo è lo spirito con cui è stata redatta la Tesi. Se inteso come manuale, esso fornisce un fulgido vademecum sul complesso mondo del monitoraggio dinamico. Di converso, se letto con l'occhio critico di una troppo spesso dormiente amministrazione pubblica, può fornire spunti di riflessione per ripensare alla gestione del nostro fragile patrimonio costruito. Lo studio ha l'intento di porsi da paradigma per le strutture esistenti, incentivandone cura e sottolineando la fattibilità di una manutenzione attiva, dinamica il cui asset si fondi su Conoscenza e Ricerca.

Abstract

Structural reliability and constructed preservation are concepts of determining role in civil engineering field as well as for public opinion. The existing heritage surrounding man is variegated and fragile due to intrinsic features and environment in which it is inserted. These elements are evident at the time that special structures are involved, linked to constitution and public utility; this is the case of football stadium, on which this treatment is based. More specifically, the focus is that wide category represented by those buildings born during the Fascist era and subject to refunctionalization and modernisation works at different steps, which implied the incorporation of whole structural component, namely the roof, as happened to the Olimpico Grande Torino Stadium, pattern of this dissertation.

The historical and critical analysis, in addition to highlight the static and structural behaviour upheaval, notify the direct exigency of an extensive maintenance activity. The mean to answer this need is represented by structural health monitoring and specific SHM procedures, specialized in dynamic identification technique of the structure. Treatment develops the first stage of dynamic monitoring, represented by the planning of monitoring system of Olimpico, and treats its deployment through innovative technologies, fiber optic above all. Planning considerations get a rigorous reference in modal dynamic analysis and overall support structural calculations, which allow the fulfilment of the fundamental prerequisite linked to the building knowledge aimed to the system setting.

Through the studying of the system layout it aims to support the proposed thesis, which regards the practical applicability, the utility and potentialities of the monitoring solution of the treatment.

This dissertation is composed by 2 parts, through which it wishes to validate the importance of monitoring and the role of innovation, which has a practical feedback in the Olimpico case study. First part treats control and monitoring as structural diagnostics means, deepening theoretical aspects of varied kinds; from the state-of-the-art it goes to the second part, regarding the innovation in the field of monitoring, concepts applied in the Olimpico studies.

There are different interpretations to this paper and this the attitude which followed the dissertation editing. If it is interpreted as a manual, it provides a fulgid vademecum related the complex field of dynamic monitoring. By contrast, if it is understood in public administration critical way (like it should do, often dormant), it's able to provide food for thought in order to reconsider the maintenance of our fragile constructed heritage. The study has the intention of being standard for

existing structures, stimulating care and underlining the practicability of an active, dynamic maintenance, whose asset would be based on Knowledge and Research.

Indice

Sommario	III
Abstract	V
Elenco delle tabelle	X
Elenco delle figure	XI
Elenco degli acronimi	XV

PARTE I

Stato dell'arte

1. Diagnostica strutturale	19
1.1 Generalità	19
1.2 Degrado e durabilità	22
1.2.1 Fenomeno, cause e modalità in base al materiale costituente	22
1.2.2 Modellazione del degrado	28
1.3 Inquadramento normativo tecnico – amministrativo.	30
1.3.1 Cenni storici sull'evoluzione normativa.	31
1.3.2 Il panorama attuale	33
1.3.3 Norme internazionali.	43
1.4 Controllo e monitoraggio come metodi diagnostici.	47
2. Controllo dell'opera	49
2.1 Introduzione	49
2.2 Metodi di indagine sperimentale	50
2.2.1 Generalità.	52
2.2.2 Tecniche di indagine globale.	52
2.2.3 Prove non distruttive	54
2.2.4 Prove distruttive.	60

2.3	Piano di manutenzione	64
2.3.1	Principi di base.	64
2.3.2	Strategie manutentive	65
3.	Monitoraggio strutturale	67
3.1	Generalità	67
3.1.1	Classificazione in base alla porzione di struttura coinvolta	68
3.1.2	Classificazione in base alla frequenza di osservazione	69
3.1.3	Classificazione in base al periodo di osservazione	70
3.1.4	Structural Health Monitoring (SHM).	71
3.2	Piano di monitoraggio	72
3.3	La catena di misura.	73
3.3.1	La progettazione del sistema di monitoraggio	74
3.3.2	Hardware e Software.	77
3.3.3	Centralina di acquisizione	79
3.3.4	Sensori: gli accelerometri	79
3.4	Identificazione dinamica delle strutture	84
3.4.1	Introduzione	85
3.4.2	Presupposti e contesto di base dell'analisi modale.	85
3.4.3	Cenni alla teoria della dinamica delle strutture	86
3.4.3.1	Il SDOF e l'equazione dinamica del moto	87
3.4.3.2	MDOF: l'oscillatore multiplo.	87
3.4.4	Funzione di risposta in frequenza (FRF).	88
3.4.5	Tecniche di identificazione dinamica	90
3.4.5.1	Le famiglie di procedure EMA e OMA.	90
3.4.5.2	Classificazione delle tecniche in base al dominio	92
3.4.6	Teoria matematica alla base degli algoritmi di identificazione dinamica.	94
3.4.6.1	Equazione del moto e modelli dinamici strutturali	94
3.4.6.2	Stochastic Subspace Identification (SSI).	96
3.4.7	Fasi principali di un monitoraggio dinamico	100
I.	Pianificazione della prova.	101
II.	Acquisizione delle accelerazioni.	102
III.	Pre-processing dei segnali acquisiti.	102
IV.	Algoritmo di identificazione.	103
V.	Rappresentazione delle forme modali.	106
VI.	Validazione del modello e model updating.	108

4. Tecnologie emergenti	113
4.1 Introduzione	113
4.2 Fibre ottiche	113
4.2.1 La tecnologia a fibra ottica	114
4.2.2 Sensori a fibra ottica (FOS)	117
4.2.3 Monitoraggio tramite sistemi a fibra ottica	120
4.3 La tecnologia BIM per il monitoraggio strutturale	123
4.3.1 Descrizione della metodologia BIM	123
4.3.2 Implementazione BIM-based del sistema di monitoraggio	125
4.3.3 Digital Twin per monitoraggio intelligente	129
5. La tipologia costruttiva dello stadio	131
5.1 Cornice storica	131
5.2 Lo stadio come struttura speciale	137
6. Soluzione di monitoraggio dello stadio Olimpico di Torino	151
6.1 Lo stadio Olimpico Grande Torino	151
6.1.1 Descrizione generale	151
6.1.2 Conservazione del manufatto	152
6.2 Pianificazione del sistema di monitoraggio dello stadio Olimpico	155
6.2.1 Caratteristiche generali del sistema di monitoraggio	176
6.2.2 Progettazione del sistema	184
Conclusioni	205
Bibliografia e Sitografia	207

Elenco delle tabelle

- 1.6. Normative sullo SHM a livello mondiale
- 2.1. Classificazione dei crack - report CIB
- 5.24. Riepilogo strutture dello stadio Olimpico Grande Torino
- 6.2. Controlli e interventi sulle strutture in C.A
- 6.3. Controlli e interventi sulle strutture metalliche
- 6.6. Materiali
- 6.7. Pilastri
- 6.8. Sezioni pilastri
- 6.9. Travi
- 6.10. Sezioni travi
- 6.11. Bielle (stralli)
- 6.12. Sezioni bielle
- 6.13. Travi di fondazione
- 6.14. Sezioni travi di fondazione
- 6.15. Terreni
- 6.16. Riepilogo analisi dei carichi di progetto
- 6.17. Condizioni di carico identificate
- 6.18. Combinazione delle azioni di progetto
- 6.33. Spostamenti massimi assoluti
- 6.50. Autovalori, periodi, masse efficaci (Risultati Sisma 90°)
- 6.56. Autovalori, periodi, masse efficaci (Risultati Sisma 0°)
- 6.65. Confronto tra tecnologie: tradizionale vs ottica
- 6.85. Risultante degli sforzi (Comb.04) e conseguenti forze in fondazione

Elenco delle figure

- 1.1. Relazione tra lo stato di salute di una struttura e il tempo
- 1.2. Soglia di accettabilità dello stato di salute nel tempo
- 1.3. Curva di decadimento o curva del ciclo di vita
- 1.4. Relazione tra il rischio di guasto e il tempo per una costruzione
- 1.5. Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi
- 1.7. Inquadramento della rete SAMCO in relazione agli altri network SHM
- 1.8. Schema concettuale di base: Controllo e Monitoraggio come modalità di Diagnostica strutturale
- 2.2. Schema relativo alla classificazione dei crack da report CIB
- 2.3. Applicazione del pacometro
- 2.4. Rappresentazione schematica dello sclerometro tipo
- 2.5. Schema dei metodi di prova agli ultrasuoni
- 2.6. Rappresentazione schematica della prova di estrazione: fase 1 e fase 2
- 2.7. Schema di esecuzione "shove-test" su muratura
- 2.8. Configurazione della prova di aderenza (RILEM RC5)
- 3.1. Schema relativo all'azione di filtro esercitata dalla struttura
- 3.2. Rappresentazione schematica della catena di misura
- 3.3. Schema del processo di progettazione del sistema di monitoraggio strutturale
- 3.4. Fenomeno dell'Aliasing: segnale reale e segnale campionato "equivocato"
- 3.5. Configurazione classica della catena di misura
- 3.6. Schema concettuale dell'accelerometro: sistema massa-molla-smorzatore
- 3.7. Range di misura circoscritto dall'errore di linearità
- 3.8. Risposta in frequenza dell'accelerometro al variare della sua massa sismica
- 3.9. Implementazione di un sistema meccanico nei diversi domini di rappresentazione
- 3.10. Oscillatore semplice
- 3.11. SDOF soggetto a forzante esterna: forze agenti
- 3.12. Risonanza strutturale: amplificazione della risposta in funzione dello smorzamento
- 3.13. Rappresentazione schematica di un sistema input-output LTI
- 3.14. Comportamento del SDOF a forzante sinusoidale a frequenza variabile
- 3.15. Modello FRF: input e output
- 3.16. Rappresentazione complessa
- 3.17. Rappresentazione schematica della modalità di identificazione dinamica
- 3.18. Sistema Input-Output con rumore bianco ($F(\omega)$) e misura della risposta strutturale ($Y(\omega)$)
- 3.19. Classificazione degli algoritmi principali di identificazione dinamica
- 3.20. Procedura di identificazione dinamica
- 3.21. Archetipo: schematizzazione strutturale del sistema 3-DOF
- 3.22. Acquisizione delle accelerazioni (white noise) da parte dei 4 accelerometri
- 3.23. Grafici FFT dei segnali degli accelerometri (1,2,3) dopo l'applicazione dei filtri

- 3.24. Diagramma di stabilizzazione generato per il sistema 3-DOF
- 3.25. Dominio temporale: modo reale (sinistra) e modo complesso (destra)
- 3.26. Complexity plot dei modi del 3-DOF
- 3.27. Modello wireframe dell'archetipo e rappresentazione statica delle corrispondenti 3 forme modali
- 3.28. Confronto tra 2 set di frequenze proprie (modi numerici e modi sperimentali)
- 3.29. Confronto tra 2 set di forme modali – MAC
- 4.1. Schematizzazione di un cavo in fibra ottica
- 4.2. Fibra ottica monomodale e multimodale a confronto
- 4.3. Legge di Snell
- 4.4. Schematizzazione dei sensori intensity-based
- 4.5. Sensore FBG con 3 reticoli iscritti nella fibra
- 4.6. Struttura generale degli interferometri Fabry-Pérot
- 4.7. Componenti e funzionamento del sistema SOFO
- 4.8. Architettura di un sistema di monitoraggio a fibra ottica: sensori distribuiti
- 4.9. Multiplexing: decine di sensori leggibili in contemporanea sulla stessa fibra
- 4.10. Metodologia BIM nel ciclo di vita strutturale
- 4.11. Impiego del BIM nel processo SHM: rappresentazione BIM-based del sistema di monitoraggio
- 4.12. Vantaggi dell'impiego del BIM nel processo di SHM
- 4.13. Gerarchia delle fasi del metodo di integrazione
- 4.14. Evoluzione nel ciclo di vita dal modello BIM al DT dell'asset
- 5.1. L'architettura razionale dello stadio Olimpico Grande Torino
- 5.2. Lo stadio municipale Benito Mussolini
- 5.3. Lo stadio comunale Vittorio Pozzo
- 5.4. Lo stadio Olimpico
- 5.5. Com'era e com'è: lo stadio Olimpico Grande Torino
- 5.6. Fasi costruttive della struttura
- 5.7. Particolari costruttivi e dettagli
- 5.8. Particolare copertura
- 5.9. Costruzione dello stadio (5° mese)
- 5.10. Composizione delle tribune
- 5.11. Stralcio della planimetria strutturale
- 5.12. Dal progetto del 1928 al modello strutturale: telaio 2D e telaio 3D (blocco di tipo 1)
- 5.13. Progetto di restauro e rifunionalizzazione dello stadio (arch. Cenna, Arteco)
- 5.14. Evoluzione strutturale dello stadio Olimpico
- 5.15. Panoramica a 360°: lavori in corso e risultato finale
- 5.16. La costruzione della copertura e la completa inclusione nell'organismo strutturale
- 5.17. Telaio tipico della struttura inclusa e modellazione FEM; modello totale della copertura integrata
- 5.18. Sistema di copertura in carpenteria metallica (DX) e stralli di sostegno della copertura (SX)
- 5.19. Lo stadio Olimpico con la nuova copertura e l'ampliamento delle tribune
- 5.20. La struttura reticolare della copertura: inquadramento del campo di reticolare tipo
- 5.21. Particolari costruttivi dell'integrazione della copertura
- 5.22. Evoluzione del modello strutturale: stadio Mussolini; integrazione della copertura; modello risultante
- 5.23. Telaio portante la copertura e sezione tipo del nuovo stadio: modellazione a telaio piano
- 5.25. Rappresentazioni della struttura attuale dello stadio
- 5.26. Planimetria dello stadio Olimpico Grande Torino
- 6.1. Mappa dei settori dello stadio (tuttostadi.com)
- 6.4. Modellazione strutturale: telaio di giunto 03; blocco 120-03
- 6.5. Telaio piano 03
- 6.19. Caricamento delle diverse componenti strutturali dello stadio (vista telaio)

- 6.20. Particolari della modellazione dei carichi (vista telaio)
- 6.21. Valutazione dello spettro di risposta tramite Spettri-NTCver.1.0.3
- 6.22. Spettro di risposta adoperato nell'analisi modale
- 6.23. Inviluppi di sforzo normale, taglio e momento flettente (piano YZ)
- 6.24. Inviluppo delle deformate
- 6.25. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: inviluppo delle pressioni sul terreno [kg/cm²]
- 6.26. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: inviluppo del taglio [kN]
- 6.27. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: inviluppo del momento flettente [kNm]
- 6.28. Inviluppo dello sforzo normale
- 6.29. Inviluppo del taglio
- 6.30. Inviluppo dei momenti
- 6.31. Inviluppo di taglio e momenti nel piano 1-3
- 6.32. Inviluppo delle deformate [cm]
- 6.34. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: inviluppo delle pressioni sul terreno [kg/cm²]
- 6.35. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: inviluppo del taglio [kN]
- 6.36. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: inviluppo del momento flettente [kNm]
- 6.37. Diagramma dello sforzo normale (Comb.1)
- 6.38. Diagramma del taglio (Comb.1)
- 6.39. Diagramma di momento (Comb.1)
- 6.40. Deformata (Comb.1)
- 6.41. Diagramma dello sforzo normale (Comb.4)
- 6.42. Diagramma del taglio (Comb.4)
- 6.43. Diagramma di momento (Comb.4)
- 6.44. Deformata (Comb.4)
- 6.45. Diagramma dello sforzo normale (Comb.7)
- 6.46. Diagramma del taglio (Comb.7)
- 6.47. Diagramma di momento (Comb.7)
- 6.48. Deformata (Comb.7)
- 6.49. Spettro di progetto allo SLV (componente orizzontale) e periodi dei modi principali (Y)
- 6.51. Forma modale 1 - Y
- 6.52. Forma modale 2 - Y
- 6.53. Forma modale 3 - Y
- 6.54. Forma modale 4 - Y
- 6.55. Spettro di progetto allo SLV (componente orizzontale) e periodi dei modi principali (X)
- 6.57. Forma modale 1 - X
- 6.58. Forma modale 2 - X
- 6.59. Forma modale 3 - X
- 6.60. Forma modale 4 - X
- 6.61. Funzionamento del sistema wireless (Fonte: MOVE Solutions)
- 6.62. Sensori multipli assemblati in serie con connettori collegati
- 6.63. Central model e Sub-modelli di progetto
- 6.64. Studio di fattibilità del Digital Twin: il futuro dello stadio Olimpico
- 6.66. Individuazione del Centro operativo SHM sulle simulazioni digitali (1/3)
- 6.67. Individuazione del Centro operativo SHM sulle simulazioni digitali (2/3)
- 6.68. Individuazione del Centro operativo SHM sulle simulazioni digitali (3/3)
- 6.69. Predisposizione dei locali per SHM
- 6.70. Layout inclinometri e celle di carico
- 6.71. Layout celle di carico sugli stralli – base: planimetria generale
- 6.72. Layout celle di carico sugli stralli – base: simulazione digitale

- 6.73. Layout inclinometri in copertura – base: planimetria generale
- 6.74. Layout inclinometri in copertura – base: simulazione digitale
- 6.75. La catena ottica di misura
- 6.76. Simbologia di rappresentazione
- 6.77. Posizioni ottimali dei sensori per i modi principali Y
- 6.78. Posizioni ottimali dei sensori per i modi principali X
- 6.79. Layout del sistema – 1° anello
- 6.80. Layout del sistema – 2° anello
- 6.81. Layout del sistema – 3° anello
- 6.82. Layout del sistema – Copertura
- 6.83. Posizionamento sensori
- 6.84. Posizionamento dei telai di giunto
- 6.86. Forze scaricate in fondazione
- 6.87. Criticità della struttura - meccanismo di rotazione da instabilità globale; focus sezione Nodo I
- 6.88. Schema grafico recante l'individuazione dei Nodi critici I, II, III
- 6.89. Distinzione Zone I e II e definizione dei punti "A", "B" e "C" nel nodo I
- 6.90. Eventuali cerniere plastiche inscritte nel nodo I e andamento degli sforzi in fondazione
- 6.91. Criticità della struttura – massimo carico folla
- 6.92. Criticità della struttura – massimo carico neve
- 6.93. Posizionamento sensori ottici per i nodi critici
- 6.94. Sezione di ripresa dello sforzo dello strallo; sforzi in fondazione; deformata qualitativa; meccanismo di rotazione da corpo rigido per perdita di stabilità globale
- 6.95. Posizionamento sensori ottici in fondazione
- 6.96. Sollecitazioni struttura di elevazione
- 6.97. Posizionamento sensore sullo sperone

Elenco degli acronimi

<i>FEM</i>	Finite Element Method
NTC	Norme Tecniche per le Costruzioni
NDT	Non-Destructive Testing
UNI	Ente nazionale italiano di UNificazione
MIT	Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
ANSFISA	Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali
AINOP	Archivio informatico nazionale delle opere pubbliche
IOP	Identificativo dell'Opera Pubblica
MIT	Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili
BIM	Building Information Modeling
CdA	Classe di Attenzione
ISO	International Organization for Standardization
ISIS	Intelligent Sensing for Innovative Structures
SAMCO	Structural Assessment Monitoring and Control
FHWA	Federal Highway Administration
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
FIB	Fédération internationale du béton (International Federation for Structural Concrete)
ISIS	Intelligent Sensing for Innovative Structures
NBIS	National Inspection Standards
BMS	Bridge Management Systems
ANSHM	Australian Network Of Structural Health Monitoring
CIB	Concrete Industry Board
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
CLS	Calcestruzzo
SHM	Structural Health Monitoring
OMA	Operational Modal Analysis
EMA	Experimental Modal Analysis
FRF	Frequency Response Function
SHM	Structural Health Monitoring
ADC	Analog-to-Digital Converter

LVDT	Linear Variable Differential Transducers
IEPE	Integrated Electronics Piezo-Electric
ICP	Integrated Circuit Piezoelectric
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems
SDOF	Single Degree Of Freedom
MDOF	Multiple Degree Of Freedom
LTI	Linear Time-Invariant (System)
IRF	Impulse Response Function
AVS	Ambient Vibration Survey
PP	Peak Picking
FDD	Frequency Domain Decomposition
PSD	Power Spectral Density
SVD	Singular Value Decomposition
EFDD	Enhanced Frequency Domain Decomposition
CE	Complex Exponential
LSCE	Least-Square Complex Exponential
PRCE	Polyreference Complex Exponential
ARMA	Autoregressive Moving-Average
SSI	Stochastic Subspace Identification
FFT	Fourier Fast Transform (Trasformata Veloce Di Fourier)
FOS	Fiber Optic Sensors
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques
FBG	Fiber Bragg Grating
IBS	Intensity-based Sensors
BIM	Building Information Modelling
CDE	Common Data Environment
LOD	Level of Development
AEC	Architecture, Engineering and Construction
FM	Facility Management
IFC	Industry Foundation Classes
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
DT	Digital Twin
AI	Artificial Intelligence
PNF	Partito Nazionale Fascista
CFRP	Carbon Fiber-reinforced Polymers
PoE	Power over Ethernet
DSTS	Distributed Strain and Temperature Sensing

Parte I
Stato dell'arte

Capitolo 1

Diagnostica strutturale

1.1 Generalità

La diagnostica strutturale delle opere civili riveste un ruolo fondamentale per la conoscenza delle strutture che circondano l'uomo, dalla comprensione dei materiali costituenti alla caratterizzazione del loro comportamento statico e dinamico. Negli ultimi anni gli avvenimenti più o meno catastrofici hanno aumentato l'attenzione dell'opinione pubblica nei confronti della salvaguardia degli edifici e della sicurezza strutturale, facendo acquisire un ruolo determinante al tema del controllo e del monitoraggio delle strutture. L'interesse al riguardo è aumentato in maniera netta e continua ad aumentare, accelerando l'introduzione di nuovi metodi e procedure per la diagnosi strutturale. Ad alimentare tale fermento propulsivo si colloca in particolare la necessità di tutelare la vita delle persone e il patrimonio artistico ed edilizio che, con il passare del tempo, è naturalmente destinato all'obsolescenza. Questo requisito di tenere sotto controllo lo stato di conservazione del patrimonio esistente mira a ridurre gli epiloghi catastrofici che troppo spesso negli ultimi anni si sono segnalati in corrispondenza di fenomeni accidentali come quelli sismici.

Come afferma il prof. Enzo Siviero: *“Il tema della diagnostica strutturale è da tempo di prepotente attualità. Il "prevenire è più vantaggioso che curare", imperativo categorico della medicina, è ora direttamente mutuato anche per le costruzioni esistenti, soprattutto storiche, assimilate a un corpo vivente, almeno nella consolidata cultura italiana”*¹.

Ci si avvia dunque all'introduzione del concetto della diagnostica a partire dall'etimologia del termine, poiché una trattazione avanzata di una tematica non può prescindere dalla comprensione dell'intimo significato della parola. Diagnostica deriva dall'aggettivo diagnostico, ossia “della diagnosi, relativo alla diagnosi”; l'enciclopedia online Treccani la definisce come “il complesso di dottrine e di tecniche che sono il presupposto e la base per formulare la

¹ R. Pucinotti: “Patologia, Diagnostica, Indagini strutturali” – Prefazione di Enzo Siviero

diagnosi [...]“². Per chiarire, quindi, il concetto di diagnostica diventa inevitabile il richiamo alla diagnosi. Tale termine “deriva dal greco antico *diágnōsis*, da *diaghignóskein* (capire), formato da *diá* (attraverso) + *ghignóskein* (conoscere). La diagnosi è quindi, in generale, l'identificazione della natura e/o la causa di qualcosa, di qualsivoglia natura”³. “In medicina, la diagnosi è il giudizio clinico che mira a riconoscere una condizione morbosa in esame, cioè a identificarla con uno dei quadri descritti in patologia. [...] Spesso, per giungere a conclusioni diagnostiche, è indispensabile ricorrere a vari mezzi d'indagine: chimici, radiologici [...]. La precisa formulazione della diagnosi permette di enunciare la prognosi e applicare razionalmente la terapia”⁴. “Nel linguaggio tecnico, la diagnosi è frutto dell'analisi di malfunzionamenti in apparati, sistemi [...] che porta a individuare il punto in cui questi si sono verificati e a identificarne il tipo. Oltre che nel settore spaziale, il primo a sviluppare la diagnostica come processo completamente automatizzato, sistemi di diagnostica integrati sono oggi diffusi nel settore aeronautico, dei grandi impianti, automobilistico, elettronico e informatico, delle costruzioni”⁵. La diagnostica delle costruzioni è una branca che applicando svariati metodi di indagine mira a collezionare le informazioni utili per identificare le cause delle patologie che attanagliano le costruzioni.

Per affrontare adeguatamente la tematica, avendo a che fare con la *diagnostica*, come punto di partenza si ritiene esemplificativo valorizzare il parallelismo appena instaurato tra il mondo della medicina e l'ambito dell'ingegneria delle costruzioni. Questa analogia mira a definire un filo logico che aumenti la comprensione e la concretezza dell'elaborato, costituendo una chiave di lettura della tematica trattata.

Da una parte si colloca la figura del medico, il quale, in funzione dello stato di salute, dell'età, delle patologie pregresse sottopone il paziente a esame clinico o strumentale e può richiedere accertamenti periodici. Tutte queste informazioni vengono collezionate nella cartella clinica. Il tutto porta alla definizione dell'anamnesi, raccolta particolareggiata delle informazioni relative al paziente, utili e necessarie per studiare il caso e definire una corretta diagnosi.

In parallelo si pone la figura del tecnico, ingegnere che si occupa di diagnostica strutturale. La figura del paziente è in tal caso impersonificata dall'organismo edilizio, duale rispetto all'organismo umano. La diagnostica strutturale si rivolge infatti ad un qualunque manufatto edilizio: in genere, ma non necessariamente, si tratta di un elemento del patrimonio esistente, per il quale la normativa di riferimento, le NTC (d.m. 17 gennaio 2018, aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni) dedica l'intero ottavo capitolo. Avendo a che fare con una costruzione esistente di cui si vuole valutare la sicurezza o per la quale si vuole svolgere un processo diagnostico, è fondamentale eseguire la ricerca dei documenti disponibili riguardo alla

² Enciclopedia online *Treccani* <https://www.treccani.it/vocabolario/diagnostica/>

³ Wikipedia <https://it.wikipedia.org/wiki/Diagnosi>

⁴ Enciclopedia online *Treccani* <https://www.treccani.it/vocabolario/diagnosi/>

⁵ Enciclopedia online *Treccani* https://www.treccani.it/vocabolario/diagnosi_tecnica/

struttura: la circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP., parla di analisi storico-critica. Essa ha il ruolo di anamnesi, ossia raccolta di informazioni sulla storia dell'opera volta alla sua conoscenza e all'interpretazione della situazione attuale dell'edificio come risultato di vicende statiche e trasformazioni nel tempo. Il tecnico si occupa di vigilare sullo stato di conservazione del bene, anche in funzione dell'importanza dell'opera e del livello di sicurezza richiesto. Attua quindi questa attività di controllo e monitoraggio applicando i metodi di indagine strutturale e le tecniche di monitoraggio, materia del presente elaborato. In questo modo può redigere la controparte del referto medico, ossia il piano di manutenzione e il piano di monitoraggio che consentono la regolamentazione delle fasi manutentive e gestionali delle strutture. L'esecuzione di tali controlli periodici consente la conoscenza e la gestione della struttura, indispensabile per la pianificazione di interventi sull'opera. In ciò si configura la diagnostica strutturale, in un controllo periodico volto a monitorare e verificare lo stato di salute della struttura.

La definizione di “stato di salute” di una struttura risulta significativo per l'inquadramento del contesto in esame. Si definisce salute come “stato (omissis) espressione di normalità strutturale e funzionale dell'organismo considerato nel suo insieme”⁶. Per stato si intende “l'insieme dei valori assunti in un certo istante da variabili (variabili di stato) scelte per rappresentare la risposta del sistema strutturale sotto l'effetto delle azioni”⁷. In sintesi la salute può essere considerata come una condizione di rispondenza allo stato considerato *normale* ossia lo stato previsto in progetto ed esecuzione.

Il concetto di stato di salute è da riferirsi al patrimonio oggetto di salvaguardia e il cui stato di conservazione è da tenere sotto controllo. Si tratta del patrimonio edilizio italiano. Esso occupa un tema centrale per l'intera economia nazionale e presenta caratteristiche peculiare che lo rendono sensibile: la sua età, il suo stato, il territorio entro cui si colloca. Il patrimonio strutturale italiano ha radici che partono da metà '900, quando nel secondo Dopo Guerra le opere che erano state distrutte furono oggetto di nuova realizzazione. Ciò significa che il 60% del patrimonio è stato progettato con normative superate e presentano un'età superiore ai 50 anni, per cui hanno raggiunto la fine della vita utile. Per ciò che concerne lo stato, negli ultimi anni in Italia si sono verificati numerosi crolli strutturali e molti di questi hanno riguardato strutture di età piuttosto bassa, ad esempio il Ponte Morandi a Genova il 14/08/2018. In altri termini, la vulnerabilità sismica del costruito, con particolare riferimento all'Italia, risulta elevata. Per ultimo, si fa menzione anche all'elevata pericolosità sismica del territorio in cui si trova a coesistere il patrimonio in esame. Ciò si traduce in un elevato rischio sismico complessivo a cui è possibile controbattere tramite strategie di controllo e monitoraggio, al fine di supervisionare lo stato di salute delle strutture fornendo diagnosi il più possibile mirate e tempestive.

⁶ Enciclopedia online *Treccani*

⁷ Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 3: Termini, definizioni e abbreviazioni

1.2 Degradò e durabilit 

Il problema del controllo e del monitoraggio delle strutture si presenta considerando il fatto che, a causa dell'interazione che si instaura tra edificio e ambiente esterno, lo stato di una struttura non si pu  assumere stabile nel tempo bens  risulta soggetto a variazioni che portano il suo stato a discostarsi dalla condizione di normalit .

Il tema della durabilit  delle costruzioni ha un'importanza notevole nei paesi industrializzati, i quali hanno subito un notevole sviluppo in campo edilizio. Tale importanza dell'efficienza delle costruzioni in esercizio   dovuta alla necessit  di garantire lo svolgimento delle attivit  umane in sicurezza ed economicit . Tuttavia, invecchiamento dei materiali, usura, evoluzione delle condizioni d'uso, eventi rari e cambiamenti climatici, associati a variazione delle azioni ambientali sulle opere, minacciano tale efficienza, rendendo le costruzioni vulnerabili al cospetto di degrado ed obsolescenza. Le societ  moderne si ritrovano, dunque, a dover rispondere attivamente a questa lotta al contrasto del degrado, sfida assai rilevante e che richiede un dispendio economico enorme. Un sostegno fondamentale in questa risposta proviene dalla tecnologia che avanza facendosi promotrice dell'obiettivo di garantire durabilit  elevata del patrimonio: le soluzioni avanzate riguardano lo sviluppo di nuovi materiali, l'applicazione di metodi di progettazione sofisticati e l'attuazione di strategie di gestione della sicurezza del patrimonio costruito (Asset Integrity Management⁸), ambito in cui il monitoraggio strutturale riveste particolare attenzione.

1.2.1 Fenomeno, cause e modalit  in base al materiale costituente

Con *degrado* si intende il processo di perdita prestazionale subito da un organismo strutturale e causato dall'azione di agenti esterni di varia natura. Le strutture, infatti, e in particolare i materiali strutturali, in esercizio devono interfacciarsi con il mondo esterno e sono soggette ad un insieme di azioni che agiscono sulle propriet , alterandole. Di conseguenza, il danno   identificabile come una variazione delle condizioni iniziali della struttura, le quali ne definiscono lo stato zero iniziale. Il concetto di degrado cos  formulato presenta validit  universale nei confronti dei diversi materiali costituenti.

Per ci  che concerne la valutazione del degrado, in base al metodo utilizzato pu  essere svolta una valutazione diretta o indiretta: la differenza sta nel confronto o meno con il suddetto *stato zero*. Con i metodi diretti il danno viene determinato tramite la sua osservazione diretta sul manufatto. La categoria di metodi indiretti prevede invece la rilevazione del danno sulla base del confronto tra i valori assunti da determinati parametri dopo la costruzione o previsti in sede di progetto e quelli assunti in sede di indagine. Appartengono a tale categoria i metodi

⁸ Norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" 2016

di indagine distruttivi (da cui si ricava un parametro del materiale che va confrontato con lo zero iniziale), le prove di carico e l'analisi dei modi di vibrare di una struttura come metodo diagnostico. In tal caso, è possibile eseguire la rilevazione dell'eventuale danno solo mettendo in relazione le misure degli stessi parametri in condizioni antecedenti al processo degradante.

Uno dei principi da considerare per la progettazione di un qualunque organismo edilizio è rappresentato dalla conservazione delle proprietà di progetto, le quali è bene si mantengano inalterate per un periodo almeno pari alla vita nominale dell'opera. *La vita nominale di progetto V_N di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali*⁹. In tal modo si mira a garantire la fruibilità della struttura considerando la funzione per cui la stessa è stata realizzata.

Il contesto in cui la struttura si trova ad operare vede l'interazione tra sistema di carichi sollecitanti e stress ambientali agenti sui materiali. Le minacce per una struttura, secondo il criterio progettuale del rapporto capacità/domanda, derivano dalla variazione dell'entità delle azioni (lato azioni, ossia domanda) oppure dalla variazione delle caratteristiche geometriche e/o meccaniche (lato resistenza, ovvero capacità). Lato capacità, risultano fondamentali i processi degradanti cui le strutture e i corrispondenti materiali possono essere soggetti. Infatti, la resistenza degli elementi strutturali può essere ridotta dall'azione fisica e/o chimica dell'ambiente esterno, da cui dipendono modalità e aggressività del fenomeno.

Si arriva così al dunque: conoscere i meccanismi di degrado delle strutture diventa basilare per poter controllare lo stato di conservazione del costruito e, soprattutto, per progettare la procedura dei controlli periodici sulle strutture. Essi hanno l'obiettivo di analizzare il margine di sicurezza strutturale, definendo il livello prestazionale residuo. Qualora la verifica evidenzia l'incompatibilità delle caratteristiche meccaniche o dei fattori di sicurezza sarà necessario eseguire interventi riabilitativi. Il controllo e il monitoraggio rappresentano le pratiche che il tecnico ha a disposizione per fronteggiare degrado e dissesto. Il loro obiettivo è quello di prevenire possibili ulteriori degni, controllarne l'evoluzione temporale e definire le cause di innesco del fenomeno, nell'ottica di intervenire in modo rigoroso per mantenimento e riabilitazione strutturale.

Al fine di delineare un quadro completo della problematica, è bene definire le principali cause e i più comuni fenomeni di degrado che si possono manifestare sulle strutture. La comprensione delle cause di degrado di una struttura, in termini di elementi strutturali e materiali costituenti, è fondamentale al fine di intervenire in maniera mirata alla risoluzione del problema. Le sorgenti di innesco, ossia le cause che si trovano a monte di un processo degradante, possono essere molteplici. Si evidenziano:

⁹ Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18) – d.m. 17 gennaio 2018 cfr. §2.4.1: *Vita nominale di progetto*

- Cause di tipo fisico

Sono associate alle variazioni termoigrometriche.

o Cicli di gelo – disgelo:

il processo degradante è in tal caso legato al congelamento dell'acqua presente nei pori capillari del calcestruzzo, il cui volume può incrementarsi anche del 9% in corrispondenza del cambio di stato. L'attivazione del fenomeno avviene intorno a 0°C per cui i cicli sono associati a variazioni termiche a cavallo di tale temperatura. Se le pressioni interne dovute all'espansione superano la resistenza a trazione del materiale si verifica la degradazione dello stesso.

o Ritiro:

fenomeno tipico del calcestruzzo che si riduce in volume a seguito della perdita di acqua interstiziale durante la presa. Ciò può determinare la comparsa di tensioni di trazione nel calcestruzzo, se armato, non sopportabili dallo stesso, con conseguente fessurazione.

o Calore di idratazione:

le reazioni chimiche durante la presa del calcestruzzo avvengono con sviluppo di calore (anche con temperature di 40°C). Al raffreddamento, la parte esterna, essendo esposta all'aria, si raffredda molto più rapidamente. La conseguenza è la nascita di tensioni di trazione all'interno del materiale¹⁰.

o Incendio:

gli effetti sono legati alle alte temperature e, come descritto da Maiellaro¹¹, si manifestano attraverso due tipi distinti di danneggiamento: spalling e riduzione di resistenza. Lo spalling è lo schiacciamento, esplosione e sfaldamento degli inerti; oltre i 300°C il materiale subisce fenomeni che comportano il degrado permanente della resistenza e a circa 600°C la resistenza si riduce anche dell'80%.

- Cause di tipo chimico

Sono dovute principalmente all'attacco di agenti chimici o reazioni di natura chimica con effetto degradante. Si tratta di processi chimici spontanei, che si innescano in maniera del tutto naturale.

o Attacco di solfati, solfuri e cloruri:

si verifica qualora il calcestruzzo si trovi a contatto con acque e terreni contenenti solfati, acque marine e ambienti industriali che emettono nell'atmosfera vapori o gas ricchi di SO₂ e/o SO₃. Le reazioni chimiche che si possono verificare conducono alla formazione di prodotti espansivi che causano il rigonfiamento del materiale seguito da microfessure e distacco, nel caso di formazione di ettringite, oppure la riduzione della sua resistenza meccanica, nel caso di formazione di gesso.

¹⁰ Rotta A., *La durabilità e il degrado delle strutture in cemento armato*, digilander.libero.it/FlyingDutch/articoli/cls.htm

¹¹ Maiellaro N., *Prove non distruttive in edilizia: Prove sclerometriche ed ultrasoniche sui calcestruzzi*, CNR-IRIS, Vol. I, Quaderno n.12, 1995

1. Formazione di gesso biidrato in presenza di idrossido di calcio:



2. Formazione di ettringite in presenza di di alluminati idrati di calcio:



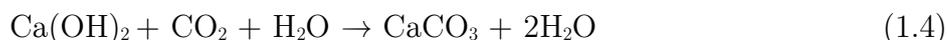
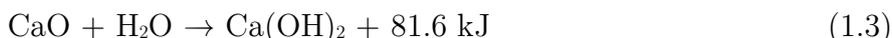
o Reazioni alcali – aggregati:

si tratta di fenomeni che danno luogo a prodotti espansivi che comportano il danneggiamento del calcestruzzo. Queste reazioni si verificano in presenza di ambienti umidi e alte temperature, nel caso di calcestruzzo i cui aggregati contengono alte percentuali di silice amorfa, i cui ioni idrossidi reagiscono con gli alcali del cemento.

o Carbonatazione:

reazione chimica che porta alla formazione di carbonato di calcio, CaCO_3 , con conseguenze dannose sia per il calcestruzzo che per l'armatura. La carbonatazione è infatti una delle cause della corrosione: comporta la depassivazione, con conseguente attivazione della corrosione dell'acciaio.

Inizialmente l'ambiente del calcestruzzo è basico (pH tra 12 e 13): la presenza di ossido di calcio, prima, e di idrossido di calcio, dopo la reazione esotermica (1.3) meglio nota come spegnimento della calce viva, garantisce un ambiente alcalino che conferisce passivazione alle barre di armatura. La passivazione è dovuta alla formazione di uno strato sottile che protegge le barre da ulteriore corrosione, pericolosa in quanto a velocità elevata. L'idrossido di calcio è però instabile: con umidità e anidride carbonica viene convertito in un composto più stabile, il carbonato di calcio. Tale fenomeno è noto come carbonatazione ed è descritto dalla reazione (1.4). Questa trasformazione è accompagnata da una riduzione del pH, sino a 6÷7, che rende l'ambiente acido o neutro. Tale ambiente creatosi comporta la depassivazione delle barre di armatura: il suddetto strato sottile viene distrutto e la corrosione è libera di manifestarsi in presenza di acqua, che significa umidità, e ossigeno.



La carbonatazione è confinata alla zona corticale, in cui si trova l'anidride carbonica e il fronte di carbonatazione, ossia l'ente geometrico che separa le due zone, si muove internamente nel tempo verso il centro. Lo strato carbonatato aumenta secondo l'equazione (1.5)¹²:

$$s = K \cdot \sqrt{t} \quad (1.5)$$

in cui:

s indica lo spessore dello strato carbonatato;

t rappresenta il tempo;

K è un coefficiente che esprime la velocità di carbonatazione, determinato tramite taratura sperimentale

¹² Pedferri P., Bertolini L., *La curabilità del calcestruzzo armato*, McGraw-Hill, 2000

- Cause di tipo accidentale o meccanico

Si tratta di eventi inattesi, che producono danni non riparabili o persino il collasso strutturale, oppure di processi legati all'impiego del manufatto nel tempo allo stato limite di esercizio, con possibile accelerazione dei fenomeni degradanti.

- o Effetti di urti, esplosioni, erosione, vibrazioni, sisma, abrasione:

L'abrasione è da limitarsi principalmente ai casi di materiale impiegato in pavimentazioni stradali. L'erosione è un problema legato all'azione meccanica delle onde e delle maree, dunque amputabile all'acqua marina, come l'attacco di sali. Mentre l'effetto degli urti è di natura impulsiva, gli effetti delle vibrazioni sugli elementi strutturali sono pericolosi nel caso di fenomeno protratto nel tempo.

- Cause di tipo tecnologico

Sono tra le cause principali nel caso di elementi strutturali in cemento armato.

- o Impiego di materiali di qualità scadente, copriferri inadeguati, scarsi controlli in fase di esecuzione:

Ulteriori cause in tal contesto sono rappresentate dalla composizione granulometrica degli inerti per nulla curata e i rapporti acqua/cemento molto elevati per ridurre la fatica di compattazione. Questi fattori comportano un aumento della velocità di degrado e una riduzione dei coefficienti di sicurezza¹³.

- Cause di tipo progettuale

La progettazione incide in maniera drastica sulla durabilità, un aspetto oggi considerato dall'ingegneria strutturale ma sconosciuto fino a poco tempo fa. I criteri progettuali e di posa in opera sono estremamente importanti in quanto, iniziato il processo degradante, questo può essere coadiuvato da altri fenomeni che cooperano alla riduzione delle prestazioni.

- o Strutture realizzate in mancanza di calcoli strutturali o con calcoli strutturali inadeguati:

Rientrano in tale categoria gli edifici aventi elementi strutturali proporzionati sulla base delle pratiche costruttive dell'epoca di realizzazione e i manufatti che, a causa di variazione della destinazione d'uso, hanno subito un incremento dei sovraccarichi.

Dopo la casistica relativa alle cause di degrado, si procede brevemente a definire le modalità in cui il processo degradante trova attuazione, eseguendo una distinzione delle strutture sulla base del materiale di cui sono composte. Tale distinzione tipologica risulta congeniale in quanto verrà successivamente ripresa per la descrizione dei metodi di indagine strutturali, su cui si basa il controllo dei manufatti. Si considerano i principali materiali costituenti, ossia

¹³ Augenti N., *Il crollo dell'edificio in Napoli al rione Arenella. Crolli ed affidabilità delle strutture*, Structural Diseases and reliability – Atti del II Convegno Internazionale su Crolli e Affidabilità delle strutture, Napoli, CUEN, pagg. 21-28, 2003.

Capuozzo S., *Due casi emblematici di collassi spontanei a Napoli*, Crolli ed affidabilità delle strutture – Structural Diseases and reliability – Atti del II Convegno Internazionale su Crolli e Affidabilità delle strutture, Napoli, CUEN, pagg. 41-48, 2003.

calcestruzzo armato, muratura, acciaio, legno e si associano di fatto le suddette cause a ciascun membro di tale casistica.

- Degrado delle strutture in calcestruzzo armato
gli ingredienti per la corretta conservazione del materiale sono un'adeguata progettazione e una messa in opera secondo le dovute prescrizioni operative, per il raggiungimento delle caratteristiche di progetto. A ciò si aggiunge l'esigenza di controllo e monitoraggio della condizione del materiale, per intervenire alle prime avvisaglie di degrado con azioni conservative.
 - o Degrado per errata progettazione, posa in opera e stagionatura
 - o Degrado per azione chimica di agenti esterni
 - o Degrado per azione fisica di agenti esterni
- Degrado delle strutture in muratura
La grande variabilità di componenti e di tecniche impiegate rende necessari tutta una serie di studi sulle tecniche e i materiali diffusi all'epoca di costruzione.
 - o Degrado per errata progettazione e posa in opera
 - o Degrado per azione chimica di agenti esterni
 - o Degrado per azione fisica di agenti esterni
- Degrado delle strutture in acciaio
Dato che il materiale acciaio è poco vulnerabile chimicamente e impermeabile agli agenti esterni e i metodi di realizzazione delle opere di carpenteria sono estremamente precisi essendo svolti in officina, le strutture in acciaio sono meno soggette ai danni da invecchiamento e interazione con sostanze dell'atmosfera, rispetto alle opere in C.A. I principali pericoli sono rappresentati dall'ossidazione, da cui risulta la corrosione, e dall'effetto dei carichi a lungo termine. È prassi consolidata la prescrizione di controlli relativi alla tesatura degli stralli o alla coppia di serraggio dei bulloni.
 - o Degrado per azione chimica di agenti esterni
 - o Degrado per l'azione dei carichi esterni
- Degrado delle strutture in legno
Il legno costituisce un materiale atipico in tal contesto, come testimoniato dalle differenti minacce di degrado che presenta: interazione con l'ambiente esterno e alterazioni biologiche.
 - o Degrado per l'interazione con l'ambiente esterno
 - o Degrado per alterazioni biologiche

1.2.2 Modellazione del degrado

La rappresentazione del degrado attraverso modelli matematici rigorosi non è banale a causa del modo differenziato in cui diversi membri strutturali tendono a degradarsi e a causa dei fenomeni complessi che concorrono al degrado di un sistema strutturale.

Di recente sono stati proposti svariati modelli semplificati che si basano su un unico parametro sintetico al quale viene data la funzione di rappresentante dell'efficienza del sistema strutturale nel tempo. Tra questi, si evidenziano i modelli che utilizzano il coefficiente di affidabilità strutturale β e i modelli fondati su un indice di efficienza globale, derivante da combinazioni delle misure dell'efficienza degli elementi più critici, dipendenti dal loro stato di salute.

Una prima modalità di modellazione del degrado consiste nella possibile rappresentazione grafica del livello di salute di una struttura nel tempo per mezzo di una parabola discendente¹⁴ dovuta all'azione di tempo e ambiente:

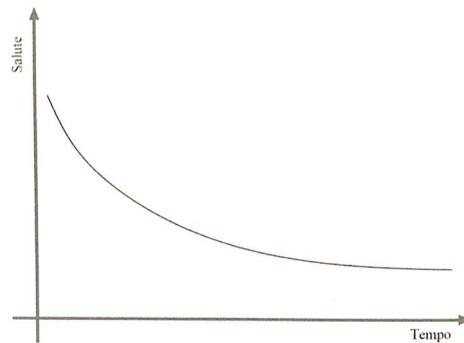


Figura 1.1. Relazione tra lo stato di salute di una struttura e il tempo¹⁵

La diagnostica ha come obiettivo primario la valutazione nel tempo dello stato di salute, verificando la collocazione dello stesso rispetto ad una soglia di accettabilità definita in funzione dei carichi previsti e della capacità degli elementi strutturali. Tale soglia divide lo stato di normalità dalla condizione di struttura non in grado di garantire adeguati livelli di sicurezza. In tal caso, sarà necessario intervenire sull'opera tramite l'attivazione di un processo di riqualificazione mirato a ripristinare le condizioni di sicurezza.

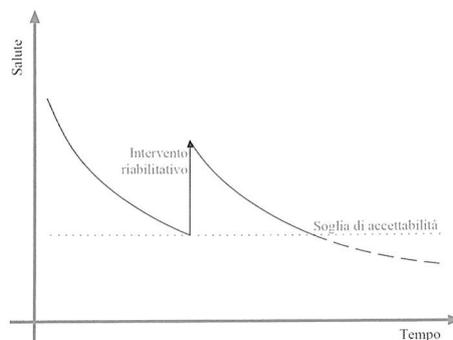


Figura 1.2. Soglia di accettabilità dello stato di salute nel tempo¹⁶

¹⁴ ¹⁵ ¹⁶ *Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici*, Prof. Manzone - Introduzione

In parallelo, si procede all'illustrazione di una seconda modalità di modellazione del fenomeno degradante, ossia l'approccio recentemente formulato nel documento tecnico CWA 16663, proposto dalla Normativa UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" del 2016. Tale norma, assunta come regolamentazione di riferimento per il monitoraggio nel presente elaborato e opportunamente approfondita nel capitolo successivo relativo al quadro normativo in materia, dedica un capitolo all'utilizzo delle tecniche di monitoraggio strutturale nella gestione del costruito. In particolare, il §11.2 è proprio intitolato alla modellazione del degrado e ivi viene affermato che l'effetto del degrado è rappresentato da funzioni decrescenti nel tempo con leggi esponenziali, definite *curve del ciclo di vita* o *curve di decadimento*. Tale figura¹⁷ ne riporta il tipico andamento:

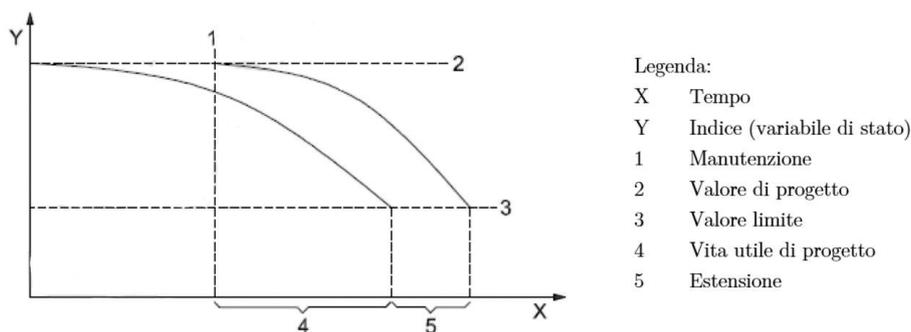


Figura 1.3. Curva di decadimento o curva del ciclo di vita

Tale metodo è stato già adottato come standard in vari Paesi europei, utilizzando espressioni semplificate della curva con formulazioni di tipo probabilistico per la presa in conto delle incertezze nella previsione della curva di degrado e bande di confidenza ottenute sulla base di dati statistici riguardanti in gran parte i ponti.

La conclusione della vita operativa della struttura si ha in corrispondenza del raggiungimento del valore limite dell'indice. Tale limite non è però necessariamente coincidente con la fine della vita di progetto, in quanto, in accordo con quanto detto in precedenza, la vita operativa può essere estesa a seguito di interventi di manutenzione (riabilitazione) che consentono di ristabilire il valore iniziale dell'indice durante la vita della struttura. Ciò spingerebbe a pensare che, al limite, la vita operativa possa essere estesa all'infinito, attuando un intervento dopo l'altro. Tuttavia la manutenzione ha un costo e quindi alla base sono necessarie analisi di costo/beneficio, evidenziando che il costo è funzione stretta del grado di recupero dell'indice di efficienza rispetto al valore di progetto. Per cui può ritenersi valida l'opzione zero, ossia la decisione di non procedere ad alcun intervento, oppure la demolizione, strategia da percorrere qualora il cumulo dei benefici attesi risulti inferiore ai costi cumulati.

Per ciò che concerne la modalità secondo cui viene svolta la riabilitazione strutturale, essa è definita per la specifica struttura in oggetto sulla base delle sue caratteristiche peculiari,

¹⁷ Norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" 2016 – Capitolo 11: Utilizzo delle tecniche di monitoraggio strutturale nella gestione del costruito

come materiali, vincoli, statica e geometria. L'unicità di ogni struttura rende in sostanza impossibile la generalizzazione dei controlli e interventi che consentirebbe una standardizzazione avente lo scopo di mantenere efficiente lo stato di salute dell'oggetto.

Ciò si è tradotto nella necessità di attuare strumenti come il piano di manutenzione, i quali tengono conto dei criteri progettuali e delle peculiarità dell'edificio, per definire in progetto i criteri di verifica dello stato di salute e la loro frequenza nelle diverse fasi di vita. *Figura 1.4* mostra l'andamento del rischio di difetti nel tempo per un generico manufatto. Il primo periodo viene definito di rodaggio in quanto caratterizzato dalla manifestazione delle problematiche legate alla fase di produzione. Le problematiche derivanti dall'azione aggressiva svolta da ambiente e tempo nei confronti di elementi e materiali possono essere arginati tramite rigorosa progettazione e gestione della struttura. In tal senso, è bene estendere il concetto di progettazione e di costruzione: *progettazione* va a riferirsi tanto all'oggetto quanto alla sua manutenzione, così come la *realizzazione* deve essere esaustiva sia in relazione alla costruzione che all'applicazione delle strategie manutentive.

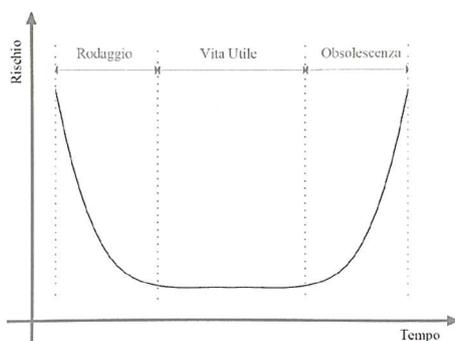


Figure 1.4. Relazione tra il rischio di guasto e il tempo per una costruzione¹⁸

1.3 Inquadramento normativo tecnico – amministrativo

Si procede all'analisi del panorama normativo in materia, in accordo con le disposizioni delle normative vigenti e con particolare riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni.

In tempi recenti gli organi legislativi italiani hanno recepito, così come l'opinione pubblica, la necessità di tenere sotto controllo lo stato di conservazione del patrimonio edilizio italiano. Tali organi hanno cercato nel tempo di delineare un corpo normativo specifico che regolamentasse anche la fase gestionale e manutentiva di un manufatto edilizio. Questo processo ha le proprie radici nelle normative degli ultimi 20 anni circa, le quali hanno introdotto l'obbligo di considerare, con opportune modalità attuative, il problema di gestione e conservazione delle costruzioni nel tempo.

¹⁸ *Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici*, Prof. Manzone - Introduzione

1.3.1 Cenni storici sull'evoluzione normativa

La tematica manutentiva è stata presa in considerazione per la prima volta dalla normativa italiana attraverso la “Legge quadro in materia di lavori pubblici”, ossia la legge n.109 del 1994, e il relativo regolamento attuativo d.P.R. n.554 del 21 dicembre 1999. Tali norme fissano i contenuti minimi del progetto esecutivo e stabiliscono: “*Il progetto esecutivo deve essere altresì corredato da apposito piano di manutenzione dell’opera e delle sue parti da redigersi nei termini, con le modalità, i contenuti, i tempi e la gradualità stabiliti dal regolamento di cui all’art.3*”¹⁹. Il regolamento indica le tre parti significative del piano di manutenzione: il manuale d’uso, il manuale di manutenzione e il programma di manutenzione.

Le indicazioni riguardo al piano di manutenzione sono state mantenute ed integrate nel “codice dei contratti”, d.lgs. n.163 del 12 aprile 2006, che ha sostituito la legge n.109 del ’94, e nel relativo regolamento attuativo d.P.R. n. 207 del 5 ottobre 2010. Tale regolamento ricalca il regolamento menzionato in precedenza, il d.P.R. 554/99, avvalorando la rilevanza di un documento per l’organizzazione e la predisposizione delle modalità e tempistiche di esecuzione delle operazioni finalizzate alla gestione del manufatto, intesa come controllo e monitoraggio, ossia al mantenimento nel tempo del livello di prestazione della costruzione in toto e di ogni sua parte.

La suddetta importanza conferita alla pianificazione manutentiva trova riscontro e sviluppo normativo nelle NTC. L’aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (d.m. 17 gennaio 2018) richiama le disposizioni del regolamento attuativo del codice dei contratti; viene altresì ribadito che il piano di manutenzione costituisce parte essenziale del progetto esecutivo, in quanto si afferma che: “Il progetto deve comprendere i seguenti elaborati: [...] piano di manutenzione della parte strutturale dell’opera”²⁰. In tal senso, si impone al tecnico l’analisi delle soluzioni manutentive già in fase di progettuale. Ciò non può che influenzare la progettazione, con la messa in discussione delle soluzioni progettuali sotto il punto di vista della manutenibilità e dell’accessibilità delle parti sensibili dell’opera. L’obbligo di stesura del suddetto piano, in altre parole, spinge il progettista ad adottare soluzioni mirate ad un agevole futuro controllo della struttura.

I principali passi nell’evoluzione normativa italiana vengono evidenziati attraverso un excursus dei suoi principali protagonisti:

- Circolare Ministeriale LL PP 6736/61A1
- Circolare Ministeriale LL PP 220977 02/08/1980
- Circolare Ministeriale LL PP 34233 25/02/1991
- Norma UNI 10985 “Vibrazioni su ponti e viadotti” 2002

¹⁹ Legge Merloni (1994), “Legge quadro in materia di lavoro pubblici”, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 11 febbraio 1994, n.109

²⁰ Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18) – d.m. 17 gennaio 2018 cfr. §10.1: *Caratteristiche generali*

- OPCM n.3274 20/03/2003

Circolare Ministeriale LL PP 6736/61A1

Questa legge è stata emanata a seguito del crollo del ponte di Ariccia del 1967, a testimonianza di come, spesso, il corpo normativo si attivi in conseguenza di eventi particolarmente rilevanti, tragedie e qualsivoglia evento che rende evidente la necessità dell'intervento normativo. È una delle prime leggi del Ministero dei Lavori Pubblici a contenere al suo interno delle linee guida per il controllo delle opere. Andando più nello specifico, la Circolare impone una sorveglianza continua delle strutture e ha come obiettivo la vigilanza e il controllo a cadenza fissata. Le ispezioni minori sono da effettuarsi con cadenza trimestrale, mentre le indagini più approfondite sono da eseguirsi ogni anno. L'esecuzione dei controlli è affidata a tecnici abilitati, i quali devono redigere il "Controllo periodico stabilità opere d'arte", documento redatto post ispezione e consegnato al Ministero dei Lavori Pubblici e all'ANAS. Tale documento deve contenere: dati dell'ispezione e dell'ispettore, disegni, grafici, fotografie, relazioni, scheda riepilogativa della vita del manufatto.²¹ Tale Circolare, essendo l'unica a definire la periodicità dei controlli, trova oggi ampia applicazione.

Circolare Ministeriale LL PP 220977 02/08/1980

In essa vi sono principalmente indicazioni sulla progettazione dei ponti stradali. Pur non facendo riferimento in modo specifico alla possibilità di monitoraggio strutturale tramite apposita strumentazione, indica la necessità di prevedere nelle fasi di progettazione ed esecuzione misure e provvedimenti finalizzati ad assicurare l'ispezionabilità delle varie componenti dell'opera.

Circolare Ministeriale LL PP 34233 25/02/1991

Tale legge è un aggiornamento delle precedenti, con cui si invitano gli enti gestori ad effettuare operazioni di vigilanza, ispezione, manutenzione ordinaria e straordinaria, interventi di restauro, adeguamento, ristrutturazione. Più nello specifico, si prevedono interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria al fine di conservare l'opera; mentre, in casi eccezionali come terremoti, frane, alluvioni, sono da svolgersi delle ispezioni straordinarie. In misura nettamente superiore rispetto alle altre norme dell'epoca, tale Circolare evidenzia l'importanza della manutenzione per grandi strutture, come i viadotti.

Norma UNI 10985 "Vibrazioni su ponti e viadotti" 2002

La norma definisce i criteri per prove e rilievi dinamici, in merito alle quali indica la classificazione delle opere, le tipologie di indagine e controlli, le attrezzature e le tecniche di indagine appropriate. In base al tipo di manufatto e al suo materiale costituente si definiscono le procedure di identificazione dinamica da applicare, basata su un'analisi preliminare mirata allo studio del comportamento del ponte. Tale analisi è da svolgersi tramite la realizzazione di un

²¹ "Controllo delle condizioni di stabilità delle opere stradali" Circolare Ministeriale 6736/61 A1

modello e ha lo scopo di definire la tecnica di indagine più appropriata, i sensori adatti e la loro posizione.

OPCM n.3274 20/03/2003

L'OPCM n.3274 del 20/03/2003, recante i “*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*”, segna la svolta nella progettazione delle strutture in zona sismica. Con riferimento alla durabilità, tale Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri evidenzia l'importanza del controllo dello stato di salute delle strutture esistenti: questo è da svolgersi tramite indagini e rilievi in situ a cui si associano specifici livelli di conoscenza e conseguenti metodi di analisi e coefficienti di sicurezza.

1.3.2 Il panorama attuale

Di recente è stato introdotto il d.lgs. n.50 del 18 aprile 2016, ad attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE, 2014/25/UE. Tale norma ricalca quanto espresso nel vecchio codice, il suddetto decreto di 10 anni prima che sostituisce, e nel regolamento attuativo d.P.R. 207/2010. Nello specifico, la norma, al titolo II, relativo alla progettazione e verifica del progetto, capo I, dedicato alla progettazione, sezione IV, progetto esecutivo, articolo 38, dedica 9 commi al piano di manutenzione dell'opera e delle sue parti. In tale parte della norma si ribadiscono le caratteristiche del documento finalizzato alla programmazione dell'attività di manutenzione e si indicano, come il codice dei contratti, le specificità delle tre componenti del piano.

Il crescente interesse nei confronti dell'argomento del monitoraggio strutturale è la ragione dell'emanazione di un rapporto tecnico UNI/TR. Si tratta della UNI/TR 11634, “Linee guida per il monitoraggio strutturale” che l'ente di normazione italiano ha introdotto per fornire le linee guida sull'argomento, fissando i criteri di progettazione dei sistemi di monitoraggio, le metodologie di identificazione dello stato delle strutture e i requisiti e le caratteristiche dei componenti logici del sistema. Tale strumento normativo sarà oggetto di una più ampia trattazione nell'exkursus normativo di cui in seguito.

La sempre maggiore attenzione dedicata alla durabilità del manufatto viene ulteriormente confermata dalla legge di riferimento per le costruzioni, le NTC. A tal riguardo, l'attenzione della norma è posta:

- Imponendo la redazione del piano di manutenzione, parte integrante del progetto esecutivo;
- Dedicando il capitolo 8 alla trattazione delle costruzioni esistenti;
- Prescrivendo una serie di controlli di accettazione sui materiali, da prodursi con sistema di qualità chiaro e controllato, mirato a migliorare la qualità e, quindi, la durabilità.

Si evidenzia che, ad oggi, le norme vigenti non richiedono la stesura di piani di controllo o di monitoraggio diversi dal piano di manutenzione, che invece è obbligatorio. Il monitoraggio, poi, è facoltativo in base alle caratteristiche del manufatto, del suo sito, della sua importanza e funzione eventualmente strategica, della sua vulnerabilità, della sua eventuale soluzione innovativa. Nonostante non sia obbligatorio un sistema di monitoraggio, si evidenzia che le norme rimarcano il ruolo del progettista nell'analisi della gestione dell'opera, tema ricorrente nel testo.

Al precedente excursus si contrappone quello relativo al panorama attuale:

- Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016
- Decreto Genova 19/11/2018
- Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti, 17/04/2020
- Decreto Rilancio

Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016

In aggiunta rispetto all'introduzione riportata nella parte di descrizione generale del paragrafo, si procede ad una analisi dettagliata della norma principe in materia di monitoraggio strutturale, così definibile in quanto risulta completa ed esaustiva nel definire tutti i principali aspetti legati a tale disciplina. La sua completezza e il suo grado di dettaglio fanno sì che il suo riferimento sia ricorrente in tale elaborato, in particolar modo nel capitolo dedicato al monitoraggio. Questa analisi è volta alla comprensione della tematica e dello stato dell'arte.

Come riportato dal dossier ENEA²², le “*Linee guida per il monitoraggio strutturale*”, entrate in vigore il 28 aprile 2016, sono state elaborate dal Gruppo di Lavoro GL06 “Monitoraggio strutturale”, istituito su proposta del Comitato UNI CT 021 “Ingegneria strutturale”.

Il rapporto tecnico introduce un termine nuovo: *Monitoraggio*. Il suo obiettivo consiste nel definire delle linee guida per il monitoraggio delle strutture, individuando i criteri di progettazione dei sistemi di monitoraggio e le metodologie di identificazione dello stato delle strutture. Il presente documento contiene le istruzioni per la progettazione, l'installazione e la gestione di sistemi di monitoraggio strutturale per strutture civili, in particolare edifici e ponti. Le metodologie esposte sono applicabili alle opere civili in generale.

Nell'introduzione la norma definisce il monitoraggio strutturale come “*il risultato di un insieme di tecnologie volte a determinare lo stato di un sistema strutturale e la sua evoluzione nel tempo, allo scopo di rilevare e quantificare eventuali fenomeni di degrado o di danneggiamento e di consentire l'espressione di un giudizio sull'integrità del sistema stesso (diagnosi) e sulla sua capacità di rimanere in esercizio con adeguati livelli di sicurezza per un tempo determinato (prognosi)*”.

²² ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, *Metodologie e tecniche di monitoraggio e di caratterizzazione strutturale di ponti*, Prof. Ing. Claudio Modena

Inoltre, il documento individua:

- Le caratteristiche e i requisiti del sistema;
- I metodi di rilevamento e di analisi dati;
- I metodi di identificazione del danneggiamento e del degrado dei materiali.

Le finalità del monitoraggio strutturale sono molteplici, quali:

- Una conoscenza più affidabile del comportamento della struttura mediante la correlazione carichi-azioni e conseguentemente la sua deformata attesa;
- La possibilità di identificare modellazioni più precise, criteri di dimensionamento e una miglior valutazione della sicurezza;
- Una rapida segnalazione di anomalie riguardanti la risposta strutturale, dovute in particolare al degrado delle risorse strutturali a causa del comportamento sotto azioni cicliche (fatica) o accidentali. Ciò consente di intervenire tempestivamente con interventi idonei;
- La definizione di strategie mirate al prolungamento della vita dell'opera;
- Una migliore gestione dei manufatti;
- Una raccolta di dati statistici utili per studi normativi futuri, considerando anche gli effetti dei cambiamenti climatici.

Il documento si basa su un approccio che tenta di trattare il problema in maniera vasta e per fare ciò riguarda:

- Lo scopo e il campo di applicazione;
- Gli obiettivi e i requisiti di progetto di un sistema di monitoraggio strutturale;
- La progettazione di massima del sistema di monitoraggio;
- Il progetto esecutivo del sistema di monitoraggio;
- Installazione, gestione e manutenzione del sistema di monitoraggio;
- Il trattamento dei dati, i modelli di interpretazione e i metodi di identificazione del danno, l'affidabilità dei risultati del monitoraggio;
- L'impiego delle tecniche di monitoraggio nella gestione del costruito;
- La relazione tra monitoraggio e progettazione strutturale.

Per quanto riguarda scopo e campo di applicazione, la norma si riferisce a utenti finali, progettisti e installatori/manutentori di sistemi strumentali per il monitoraggio strutturale, fornendo loro indicazioni conformi allo stato dell'arte internazionale e validi per la concezione, progettazione, manutenzione, impiego di sistemi di monitoraggio.

Il processo di monitoraggio avviene in esercizio e consiste nella valutazione dei parametri specifici caratterizzanti il comportamento della struttura, ossia proprietà fisiche e meccaniche dei materiali e caratteristiche funzionali di elementi strutturali e vincoli, e nella determinazione della variazione dei parametri nel tempo a causa del degrado.

Gli elementi principali che contraddistinguono il monitoraggio sono:

- Modello numerico della struttura: *fotografia* della struttura in un determinato istante di tempo, viene validato tramite calibrazione;
- Sistema di raccolta e gestione dati: le informazioni ricavate da diagnostica strutturale (come ispezioni, prove non distruttive, prelievo di campioni) e da opportuni sensori vengono impiegati per la calibrazione del modello e come input alle procedure di controllo;
- Procedure di elaborazione dati: per valutare le condizioni strutturali e la loro evoluzione;
- Procedure decisionali: in base ai risultati del monitoraggio, guidano nella presa di decisioni.

Gli attori del processo di monitoraggio sono:

- **Committente:**
il suo compito consiste nella richiesta o approvazione e affidamento dell'attivazione del processo. Il committente del processo di monitoraggio è in genere il proprietario della struttura o un altro soggetto che la gestisce.
- **Progettista strutturale:**
è incaricato dal committente dell'esecuzione del progetto di una struttura. Individua l'opportunità di attivare il processo di monitoraggio e ne definisce gli obiettivi in base ad analisi realizzate con modelli numerici.
- **Progettista del sistema di monitoraggio:**
può coincidere con progettista strutturale e/o con il progettista esecutivo. Possiede conoscenze di ingegneria strutturale e delle tecniche di monitoraggio strutturale. Definisce, in base agli obiettivi, il progetto funzionale di massima del sistema (tipo, numero e posizione dei sensori, architettura del sistema di acquisizione, ecc.).
- **Progettista esecutivo:**
può coincidere con il progettista del sistema o con il fornitore e installatore. È esperto nella progettazione esecutiva delle componenti del sistema; definisce le specifiche di acquisizione e installazione del sistema.
- **Fornitore e installatore:**
è responsabile della fornitura delle componenti di sistema e della loro installazione.
- **Supervisore tecnico:**
verifica la corretta fornitura ed installazione del sistema. Approva le forniture ed è responsabile della documentazione tecnica e delle procedure di messa in servizio e collaudo.
- **Gestore del sistema:**
organizzazione che prende in carico il sistema dopo il collaudo e la messa in servizio. È responsabile dell'analisi e interpretazione dei dati e della comunicazione dei risultati del monitoraggio al progettista strutturale e al committente.

Le motivazioni del sistema di monitoraggio sono riconducibili a tre:

- Programma razionale della manutenzione:
è associata alla possibilità di classificare il degrado dell'opera in base all'entità del danno. L'attività manutentiva può così concentrarsi sulle opere con più gravi processi di degrado, senza svolgersi in base a rigidi programmi temporali. Se tramite il monitoraggio si determina il tipo di danno e quindi l'evoluzione, si può mirare ad una ottimizzazione dell'uso delle risorse economiche, secondo gerarchie di criticità.
- Estensione della vita residua:
soprattutto per strutture di grande rilevanza economica e funzionale. Il prolungamento si basa sulla conoscenza della struttura e l'uso di un modello numerico aggiornato; in tal senso il monitoraggio è un elemento indispensabile.
- Approfondimento della conoscenza del comportamento di strutture innovative:
il monitoraggio è uno strumento per la validazione del funzionamento di elementi, per un loro uso più appropriato e ampie applicazioni. Più in generale consente di realizzare strutture sempre più sicure, durevoli, economiche ed ecocompatibili.

Gli obiettivi del sistema di monitoraggio sono essenzialmente due:

1. Controllo delle condizioni in cui si trova la struttura rispetto a possibili stati limite: il sistema è progettato in modo da valutare costantemente spostamenti, cedimenti, deformazioni, frequenze proprie di vibrazione e altri parametri significativi nell'individuazione di un meccanismo di collasso o del verificarsi di un imminente danno. Il confronto tra valori misurati e valori limite consente l'intervento tempestivo sull'opera.
2. Individuazione di un processo di degrado in atto: il sistema di monitoraggio individua un comportamento anomalo, rilevando entità e, nei casi più avanzati, anche origine e natura del degrado. È richiesto un modello di riferimento della struttura accurato, che sia in grado di riprodurre i meccanismi degradanti possibili e di raffrontarli a quelli derivanti dai sensori. In tal caso non si ha un confronto diretto con valori limite ma si punta ad analizzare l'evoluzione dei parametri.

Ogni opera richiede uno studio approfondito, personalizzato e specifico per determinare se attivare un monitoraggio e definire il suo grado di elaborazione; i fattori che entrano in gioco in scelta e dimensionamento del sistema di monitoraggio risultano:

- L'importanza dell'opera economicamente e funzionalmente;
- Le condizioni ambientali (con priorità alle condizioni critiche, come alto rischio sismico e clima avverso);
- La complessità e grado di innovazione della struttura;
- Il grado di affidabilità del monitoraggio e l'analisi costi-benefici.

La norma tratta un altro aspetto fondamentale per un corretto sistema di monitoraggio, ossia l'opportuna installazione, gestione e manutenzione del medesimo. Da tali attività dipende il successo del programma di monitoraggio.

Al termine dell'installazione avvengono il collaudo e la messa in servizio, tramite l'esecuzione delle prove di funzionamento di tutte le componenti; il supervisore tecnico redige opportuna documentazione di tutte le operazioni.

Invece, la gestione del sistema comprende la redazione di rapporti periodici sulle misure eseguite e sul funzionamento del sistema.

La manutenzione ordinaria del sistema consiste in operazioni periodiche di taratura e calibrazione, la sostituzione di sensori danneggiati, la pulizia dei contatti, l'esecuzione degli aggiornamenti software; la manutenzione straordinaria è necessaria in caso di sostituzione di parti significative del sistema.

I processi di interpretazione dei dati si basano su modelli fisico-matematici, modelli di analisi del segnale, modelli probabilistici, deterministici, logici. La costruzione di un modello corretto necessita di una procedura di calibrazione, in cui si esegue l'identificazione delle variabili di stato del sistema per mezzo dell'osservazione dei fenomeni fisici. Infine, si esegue una simulazione numerica a molteplici gradi di libertà per rappresentare il più fedelmente possibile il comportamento della struttura e si procede con un confronto con i dati sperimentali.

La norma inoltre introduce ulteriori indicazioni sul monitoraggio a seconda che si riferisca a strutture esistenti o opere di nuova costruzione e riporta in appendice svariati casi studio applicativi.

Viene infine trattata l'integrazione con altri sistemi di controllo, asserendo che molti edifici ed infrastrutture moderne sono dotati di sistemi di controllo energetico e di gestione (BMS – Building Management System, IMS – Infrastructure Management System) costituiti da reti di sensori controllati da sistemi di elaborazione dati. In questi casi gli incrementi di costo legati all'integrazione di sistemi di monitoraggio strutturale nel sistema di gestione sono modesti, sia per l'installazione dei sensori che per la gestione. La norma aggiunge che è compito del progettista strutturale valutare la possibilità di una progettazione integrata dei sistemi, coinvolgendo le altre figure coinvolte.

In tal senso, l'intento sarà dunque quello di dotare non solo le infrastrutture e strutture strategiche dei sistemi di monitoraggio, ma di estendere tali soluzioni anche a edifici ordinari, come abitazioni singole o condomini. Come è accaduto per la domotica, grazie alla quale i cosiddetti "smart building" sono e saranno dotati di dispositivi intelligenti in grado di comunicare con gli occupanti, si ritiene auspicabile che quanto prima questa forma di "intelligenza" venga integrata da informazioni inerenti lo stato di salute strutturale degli edifici stessi.²³

²³ A. Pierdicca, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" - Introduzione

Decreto Genova 19/11/2018²⁴ (convertito in Legge 130/2018)

Questo decreto rappresenta un ulteriore esempio di intervento normativo a seguito di crolli strutturali. Ad accendere il campanello d'allarme nelle istituzioni è stato il crollo del Ponte Morandi a Genova, da cui il nome della norma stessa. Si tratta della legge 130/2018 del 16 novembre di conversione del d.l. 109/2018, cd. Decreto Genova, pubblicato in Gazzetta Ufficiale n.269 del 19 novembre 2018. Non rappresenta una normativa per le costruzioni ma costituisce un traguardo importante per la salvaguardia delle opere pubbliche. Le novità importanti riguardano sicurezza delle infrastrutture e archivio informatico e trovano applicazione nell'ANSFISA e nell'AINOP.

Operativa dal 1° gennaio 2019, l'ANSFISA²⁵ (art.12 della legge 130/2018) è l'Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali. Ad essa sono assegnati compiti di vigilanza tecnica sull'esecuzione dei lavori e la redazione di un piano nazionale per l'adeguamento e lo sviluppo delle infrastrutture stradali e autostradali, al fine di garantire la sicurezza. La Legge all'art. 13 prevede l'istituzione dell'AINOP²⁶, l'archivio informatico nazionale delle opere pubbliche, presso il MIT; la sua funzione è quella di identificare ogni opera pubblica con un codice IOP, identificativo dell'opera pubblica, a cui fanno riferimento i dati tecnici, lo stato e il grado di efficienza, l'attività di manutenzione ordinaria e lo stato dei lavori. Come riportato sul portale web dell'Archivio, *“Ainop è una rivoluzione in tema di gestione delle opere pubbliche, garantendo sicurezza e risparmio con il monitoraggio continuo e la programmazione degli interventi: ciò viene raggiunto grazie all'interoperabilità delle varie amministrazioni che detengono e gestiscono i dati riferiti ad una opera pubblica e all'esecuzione dei lavori sulla stessa. In base ai dati forniti, AINOP genera un codice identificativo della singola opera (Iop) che racconta tutto di essa.”* L'archivio è diviso in sezioni e sottosezioni, per specifiche opere pubbliche, quali ponti, viadotti, cavalcavia, strade, aeroporti, dighe, gallerie, porti, edilizia pubblica. La Legge contiene anche informazioni riguardo al monitoraggio strutturale delle opere pubbliche. Infatti, come riportato nel Dossier approvato dalla Camera dei deputati in data 05/11/2018²⁷, *“Il provvedimento disciplina la realizzazione e la gestione di un sistema sperimentale di monitoraggio dinamico per le infrastrutture stradali e autostradali che presentano condizioni di criticità connesse al passaggio di mezzi pesanti”*. Si tratta di un sistema di monitoraggio dinamico implementato attraverso l'impiego delle più avanzate tecnologie per acquisizione ed elaborazione dati. Si prevedono sperimentazioni basate sulla tecnologia 5G, in particolare nell'area territoriale di Genova e con obiettivo la sicurezza delle infrastrutture da realizzare. Inoltre, il MIT si occupa dell'inizializzazione e dello sviluppo del sistema di monitoraggio dinamico mentre gli enti gestori devono dotarsi delle strumentazioni adeguate ad effettuare il controllo strumentale costante della sicurezza delle

²⁴ “Decreto Genova in Gazzetta Ufficiale: riepilogo di tutte le misure d'interesse” 20/11/2018, InGenio-web

²⁵ ANSFISA <https://www.ansfisa.gov.it/>

²⁶ AINOP <https://ainop.mit.gov.it/portale#/>

²⁷ Dossier 5 Novembre 2018 “Disposizioni urgenti per la città di Genova, la sicurezza della rete nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, gli eventi sismici del 2016 e 2017, il lavoro e le altre emergenze” (testo approvato dalla Camera dei deputati)

infrastrutture, anche utilizzando sistemi BIM. Si richiede, in conclusione, l'adozione da parte del MIT di un piano straordinario per il monitoraggio e la conservazione dei beni immobili, definendo, sulla base della pericolosità territoriale e della vulnerabilità, ordini di priorità dei controlli delle opere.

Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti, 17/04/2020

Dopo il crollo del viadotto Polcevera di Genova, con riferimento alla sicurezza dei ponti esistenti, si è data particolare importanza alla classificazione del rischio con l'emanazione da parte del MIT delle "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti". La sua recente pubblicazione segna una svolta normativa nell'ambito del monitoraggio strutturale. Il documento fornisce una procedura dettagliata per la gestione della sicurezza dei ponti esistenti, attraverso il censimento e la classificazione del rischio, la verifica della sicurezza e soprattutto l'attività di sorveglianza e monitoraggio. Tale procedura è basata su un approccio multilivello in cui, visti numero e complessità del patrimonio italiano, si definiscono "livelli di analisi" crescenti in base alle vulnerabilità registrate e alle classi di attenzione (CdA), a ciascuna delle quali corrispondono determinate operazioni in termini di indagini, monitoraggi e verifiche.

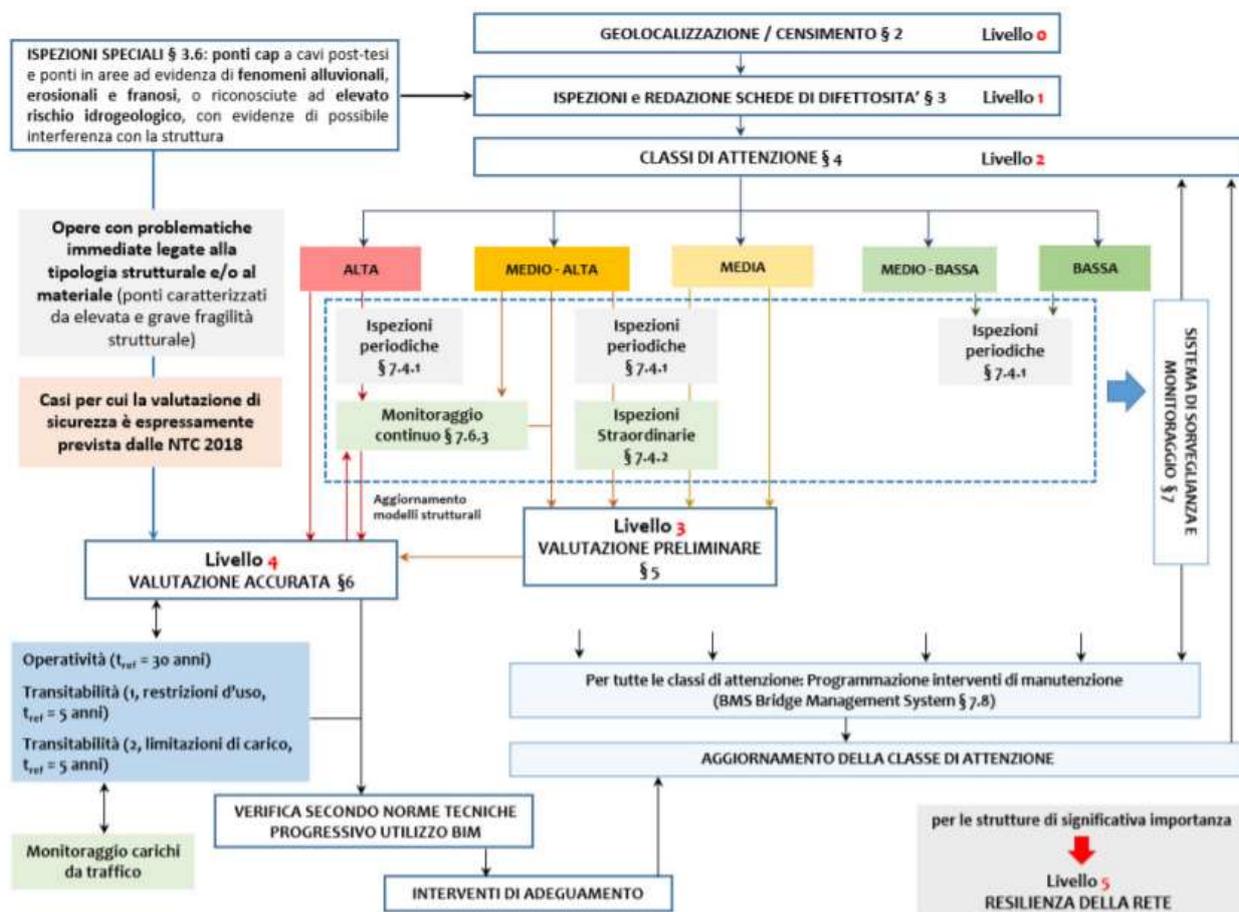


Figura 1.5. Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi

- Livello 0: censimento e caratteristiche delle opere;

- Livello 1: ispezioni visive al fine di individuare lo stato di degrado e le caratteristiche geomorfologiche e idrauliche;
- Livello 2: determinazione della classe di attenzione attraverso i parametri di rischio (pericolosità, vulnerabilità ed esposizione);
- Livello 3: valutazioni preliminari per eventuali verifiche accurate di livello 4;
- Livello 4: valutazioni accurate secondo le NTC;
- Livello 5: esecuzione di analisi più sofisticate applicata alle opere considerate di significativa importanza all'interno della rete

La Parte III del documento (*“Sistema di sorveglianza e monitoraggio”*) stabilisce le linee guida per la realizzazione di sistemi di sorveglianza e monitoraggio, descrivendone i metodi e fornendo indicatori numerici dello stato di condizione. La documentazione del sistema di sorveglianza è costituita da una serie di manuali e/o procedure operative che riguardano i diversi aspetti²⁸ della gestione della sicurezza dei ponti e degli strumenti operativi per il monitoraggio. Tra questi si evidenziano:

- Il sistema di identificazione dei ponti e degli elementi costruttivi: rappresenta la base operativa per l'esecuzione delle attività di monitoraggio, per l'analisi e l'interpretazione dei dati. Fa riferimento anche alla base dati AINOP e prevede la scomposizione dell'opera in oggetti di cui osservare lo stato di condizione, eventualmente attraverso modello BIM su cui attivare procedure di condivisione dati (interoperabilità) con i software BMS, di gestione dei sistemi di monitoraggio strumentale e di gestione della manutenzione;
- Il software per l'archiviazione dei dati: Costituito dalle componenti di archiviazione e elaborazione dei dati e per il supporto alle decisioni, denominata BMS (Bridge Management System);
- I modelli di interpretazione: per il necessario supporto alle decisioni, i dati provenienti dalle ispezioni e dal monitoraggio strumentale devono essere interpretati nel BMS e nei sistemi di gestione di monitoraggio strutturale;
- Schemi decisionali per la gestione del traffico e la manutenzione in funzione dei risultati del sistema di sorveglianza e monitoraggio: attraverso l'applicazione dei modelli di interpretazione può essere determinato lo stato di condizione dell'opera ad un certo istante di tempo e la sua probabile evoluzione. Il sistema di sorveglianza deve definire quali decisioni devono essere assunte dal gestore in funzione di questi parametri e delle classi di attenzione.

Infine si approfondisce il tema del monitoraggio strutturale (SHM – Structural Health Monitoring): si riportano le procedure di installazione di sistemi intelligenti e sensori per

²⁸ §7.2.2: *“Documentazione del sistema”*, Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti, 2020

l'identificazione di stati di danno strutturale, associati a sistemi di alert che si attivano al superamento di determinati valori soglia, da installarsi se la classe di attenzione lo richiede.

Decreto Rilancio

Il decreto legge n.34/2020²⁹, cosiddetto decreto Rilancio, convertito in legge n.77/2020, rappresenta l'ultimo ed importante aggiornamento normativo nell'ambito dei sistemi di monitoraggio strutturale; la norma riafferma l'ormai noto concetto di *Superbonus 110%*. Tale decreto, per mezzo degli artt. 119-120-121, contempla delle opportunità fiscali per la riqualificazione del patrimonio immobiliare in ambito energetico e strutturale.³⁰ La componente del decreto che risulta più di interesse e attinente fa capo al Titolo VI – “*Misure fiscali*”; nello specifico, l'art. 119 si intitola “*Incentivi per l'efficienza energetica, sisma bonus, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici*”. Il comma 4 di tale articolo difatti introduce lo sgravio fiscale nella misura del 110% delle spese relative a specifici interventi antisismici sugli edifici, definiti interventi “trainanti”. Il comma 4-bis estende la detrazione riconosciuta ai sensi del comma 4 anche alla *realizzazione di sistemi di monitoraggio strutturale continuo a fini antisismici*, a condizione che sia eseguita congiuntamente ad almeno uno dei suddetti interventi trainanti, nel rispetto dei limiti di spesa per i medesimi interventi e previsti dalla legislazione vigente.

Gli interventi antisismici trainanti a cui fa riferimento il comma 4 sono quelli già recepiti dall'articolo 16 del decreto legge n.63 del 2013, commi da 1-bis a 1-septies, ossia:

- Classificazione e verifica sismica degli immobili;
- Interventi antisismici generici;
- Fabbricati demoliti e ricostruiti da imprese costruttrici e venduti entro un anno e mezzo;
- Adozione di misure antisismiche su edifici ubicati nelle zone sismiche 1 e 2. Gli interventi sono da realizzarsi sulle parti strutturali degli edifici o complessi di edifici collegati strutturalmente e comprendere interi edifici e, nel caso di centro storico, devono essere eseguiti sulla base di progetti unitari e non su singole unità immobiliari;
- Interventi di riduzione del rischio sismico che determinino il passaggio ad una classe o due classi di rischio inferiori. L'agevolazione è attualmente fissata al 70% su case singole e al 75% nei condomini nel caso di riduzione di una classe, mentre nel caso di due classi, la detrazione passa rispettivamente all'80% e all'85%.³¹ L'applicazione è rivolta alle zone a rischio sismico 1, 2 e 3 anche mediante demolizione e ricostruzione di interi edifici.

Le agevolazioni non si applicano ad edifici ubicati in zona sismica 4.

La finestra temporale di compimento delle spese per usufruire della relativa detrazione viene fissata dal comma 1, il quale afferma che “*La detrazione [...] si applica nella misura del 110*

²⁹ D.I. n.34/2020 convertito in legge n.77/2020: Testo coordinato con le modifiche della legge agosto (legge 126/2020) e della legge di Bilancio 2021 (legge 178/2020), DL 59/2021 e DL 77/2021 (decreto Semplificazioni 2021 e legge di conversione)

³⁰ <https://www.ediltecnico.it/79681/monitoraggio-strutturale-in-continuo-decreto-rilancio/>

³¹ https://www.casaclima.com/ar_42282__decreto-rilancio-sismabonus-centodieci-esteso-anche-sistemi-monitoraggio-strutturale-continuo.html

per cento per le spese documentate e rimaste a carico del contribuente, sostenute dal 1° luglio 2020 fino al 30 giugno 2022 [...]”

In aggiunta, si riportano anche delle ulteriori informazioni, specificate dal comma 13-ter, il quale afferma la necessità della CILA per gli interventi di cui all’art.119: tali interventi infatti, anche qualora riguardino le parti strutturali del manufatto o i prospetti, escludendo il caso di demolizione e ricostruzione, rappresentano manutenzione straordinaria e sono realizzabili mediante comunicazione di inizio lavori asseverata.

1.3.3 Norme internazionali

Come viene evidenziato dai paragrafi precedenti, la legislazione italiana in tema di manutenzione e monitoraggio è piuttosto recente; a livello internazionale, invece, le normative in materia risultano più datate ed evolute.

Per quanto riguarda la manutenzione, le principali norme tecniche con carattere di internazionalità sono le norme ISO. Esse possono essere suddivise in tematiche principali³², distinguendo 4 classi: norme terminologiche, metodologiche di strumenti operativi, contrattualistiche, mirate all’organizzazione del processo manutentivo. Le norme in questione, con associato anno di emanazione, sono: ISO 9001 (1987), ISO 9004 (1994), ISO 15686-1 (2000), ISO 15686-2 (2001), ISO 15686-3 (2002), ISO 15686-4 (2014), ISO 15686-5 (2008). Solo negli ultimi anni esse sono state recepite o sono in corso di accettazione da parte dell’UNI.

In materia di monitoraggio strutturale, invece, il quadro normativo internazionale è molto più ampio e ben radicato, con particolare riferimento alla conservazione dei ponti. Dalla prima regolamentazione sul monitoraggio strutturale, le *Linee guida per lo SHM* (ISIS Canada, 2001), nuovi standard in materia vengono aggiunti e aggiornati regolarmente da governi, società, istituzioni e associazioni in tutto il mondo, al fine di accelerare l’impiego di metodologie di monitoraggio strutturale. La maggior parte dei codici pubblicati sono in inglese e sono stati prodotti attraverso istituzioni, come SAMCO in Europa. ISO ha presentato uno standard internazionale informale contenente normative tecniche e codici per il monitoraggio strutturale di ponti ed edifici basato sulle vibrazioni³³; tramite le sue 4 commissioni tecniche ha pubblicato norme che forniscono un approccio generale per la valutazione della sicurezza strutturale sulla base della prestazione sperimentale con sistema SHM.

La seguente tabella elenca i codici e le normative di manutenzione e monitoraggio dei ponti in Australia, Cina, Canada, Unione Europea, Regno Unito, Svizzera e Stati Uniti, aventi carattere regionale, nazionale o internazionale³⁴.

³² Cangialosi, Francesco, et al. (2010) *La manutenzione edile e degli impianti tecnologici*, FrancoAngeli, Milano.

³³ Yang, Y.; Zhang, Y.; Tan, X. Review on Vibration-Based Structural Health Monitoring Techniques and Technical Codes. *Symmetry* 2021, 13, 1998. <https://doi.org/10.3390/sym13111998>

³⁴ Moreu F, Li X, Li S and Zhang D (2018) Technical Specifications of Structural Health Monitoring for Highway Bridges: New Chinese Structural Health Monitoring Code. *Front. Built Environ.* 4:10. doi: 10.3389/fbuil.2018.00010

Government	Code name (reference)	Administration	Description	Pages	Year	English
Australia	Structural health monitoring in Australia (Chan and Thambiratnam, 2014)	Australian network of SHM	Introduces a background of SHM, the latest developments, and research conducted by Australian universities	193	2011	Yes
China	Structural health monitoring system technical specification for bridges in Tianjin (in Chinese) (Wang et al., 2011)	Tianjin municipal government	Developed for the bridge structure SHM in Tianjin	53	2011	No
	Design standard for structural health monitoring systems (in Chinese) (Li et al., 2012)	China association for engineering construction standardization	Used for civil engineering structure's SHM during construction and service periods	73	2012	No
	Technical code for construction process analyzing and monitoring of building engineering (in Chinese) (Mao et al., 2013)	Ministry of housing and urban-rural development of China	Designed for the construction processes that analyze and monitor buildings, specifically	65	2013	No
	Technical code for monitoring of building and bridge structures (in Chinese) (Duan et al., 2014)	Ministry of housing and urban-rural development of China	A standard for SHM of high-rise and towering structures in China	89	2014	No
Canada	Guidelines for structural health monitoring (ISIS Canada, 2001)	Intelligent sensing for innovative structures (ISIS)	Illustrates the benefits of SHM for engineers who are new to this area	127	2001	Yes
	Reinforcing concrete structures with fiber-reinforced polymers (FRPs) (Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, 2007)	ISIS	Provides design guidelines for FRP-reinforced concrete structures	151	2007	Yes
European Union	Strategic research agenda (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	Europe structural assessment, monitoring, and control (SAMCO)	An introduction to SAMCO's research agenda	35	2006	Yes
	SAMCO monitoring glossary (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Structural dynamics for vibration-based health monitoring of bridges	198	2006	Yes
	Ambient vibration monitoring (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Introduction to the ambient vibration method	243	2006	Yes
	Case studies (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Summary of SAMCO projects	170	2006	Yes
	Guidelines for structural control (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Overview of damping devices and control algorithms	155	2006	Yes
	SAMCO history and events (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Introduction to the history of SAMCO	56	2006	Yes
	Guideline for the assessment of existing structures (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Principles and routines for structural assessment	48	2006	Yes
	Guideline for structural health monitoring (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Introduction to existing procedures and technologies and recommendations for SHM application	63	2006	Yes
Report on bridge management (Structural Assessment, Monitoring and Control, 2006b)	SAMCO	Introduction to bridge management and end-user requirements	184	2006	Yes	
UK	Structural health monitoring of civil infrastructure (Brownjohn, 2007)	Philosophical transactions of the royal society of London	History and state-of-the-art developments of SHM	34	2006	Yes
Switzerland	Fundamentals of the conservation of structures (Brühwiler et al., 2011)	Swiss society of engineers and architects	Introduction to the preservation of existing structures	28	2011	Yes
United States	Development of a model health monitoring guide for major bridges (Aktan et al., 2002)	The federal highway administration (FHWA) (U.S. Department of Transportation, 2012)	Introduces SHM concepts and outlines the principles for monitoring the health performance of bridges in both analytical and experimental conditions	160	2003	Yes
	Long-term bridge performance (LTBP) Program Protocols (Hooks and Weidner, 2016)	FHWA	Delivers 51 protocols used for data collection, bridge data mining, visual inspection, sampling of materials, bridge evaluation and data management through LTBP program	335	2016	Yes

Figura 1.6. Normative sullo SHM a livello mondiale

Al fine di tracciare un quadro completo, si riportano in maniera schematica i codici e le normative sullo SHM distinti per continente (evidenziando l'assenza normativa al riguardo per il continente africano).

America

- USA: nel 1968 viene emesso il Federal Highway Act, il quale, a partire dal *National Inspection Standards* (NBIS), si pone di stabilire le linee guida per l'ispezione e l'inventario dei ponti. Successivamente, la FHWA e la AASHTO hanno pubblicato 3 manuali: *Bridge Inspector's Training Manual* (FHWA,1971), *Manual for Maintenance and Inspection of Bridges* (AASHTO,1970), *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridge* (FHWA,1972). Negli anni '90 i vari dipartimenti americani dei trasporti hanno adottato il Bridge Management Systems (BMS), poi introdotto nelle citate Linee Guida del 17/04/2020. Infine, FHWA e FIB hanno emanato le *Linee guida per lo sviluppo di un modello di guida al monitoraggio*

della salute per i ponti principali³⁵ e il Monitoraggio e la valutazione della sicurezza delle strutture in calcestruzzo esistenti³⁶.

- Canada: le *Linee guida per il monitoraggio della salute strutturale*³⁷, è stato pubblicato da Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) del Canada nel 2001 e ciò fa sì che lo standard canadese sia il più antico di tutti gli standard in ordine cronologico. Questa linea guida presenta il riepilogo provvisorio dello stato dell'arte delle tecniche SHM in quel momento, inclusi test sul campo statico, dinamico, monitoraggio periodico e monitoraggio continuo, il rilevamento intelligente (sensori a fibra ottica integrati, sensori a reticolo di bragg in fibra).

Europa

UE: l'Unione europea ha sviluppato l'associazione per la valutazione, il monitoraggio e il controllo strutturale (SAMCO). Il database SAMCO è utilizzato principalmente per la manutenzione della struttura e in particolare per la gestione dei ponti. La rete tematica europea SAMCO (GTC2-2000- 33069) è stata lanciata nel 2001 ed è associata alla pubblicazione nel 2006 delle *Linee guida per il monitoraggio della salute strutturale*³⁸.



Figura 1.7. Inquadramento della rete SAMCO in relazione agli altri network SHM

- UK: le dighe sono state le prime strutture per le quali la legislazione ha imposto ispezioni SHM. Nel 1987 il Dipartimento dei Trasporti britannico avvia un programma quindicennale di verifica della resistenza dei ponti. Viene pubblicato il documento “*BD21: The Assessment of Highway Bridges and Structures*”. Il monitoraggio, l’ispezione e la verifica delle opere sono regolamentati dal Road Asset Management³⁹. Il codice del Regno Unito introduce sensori in fibra ottica, GPS e trasduttori di impedenza piezoelettrica.

³⁵ Aktan, AE, Catbas, FN. Development of a model health monitoring guide for major bridges. Federal Highway Administration Research and Development (CONTRACT/ORDER NO.DTFH61-01-P-00347), 2002,

³⁶ Bergmeister, K. Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures: state-of-the-art report (Fib Task Group 5.1), the International Federation for Structural Concrete, 2002.

³⁷ Mufti, AA. Guidelines for structural health monitoring. Winnipeg, MB, Canada: ISIS Canada, 2001

³⁸ SAMCO Final Report 2006 F08b Guideline for Structural Health Monitoring.

³⁹ “Gestione dei ponti esistenti: il quadro normativo italiano e il confronto con alcune normative internazionali.”, INGENIO, 2020

- Germania: nel 2012 la Germania ha pubblicato una linea guida ufficiale per il monitoraggio di ponti e altre strutture ingegneristiche, Österreichische Forschungsgesellschaft, lo standard SHM tedesco. Alle ispezioni visive è stato affiancato un sistema in grado di rilevare in maniera continua le variazioni dell'opera. Il progetto è chiamato Smart Bridge (Intelligente Brücke) istituito dal Federal Ministry of Transport e dal Federal Highway Research Institute (BASt).
- Svizzera
- Austria: Wenzel⁴⁰ ha presentato e riassunto le tecnologie SHM esistenti dei ponti, che hanno fornito molte informazioni preziose per la progettazione concettuale dei sistemi SHM.
- Russia: la Federazione Russa ha sviluppato il codice russo GOSTR 53778-2010, il quale introduce l'ispezione visiva, le tecnologie di prova e gli schemi di classificazione basati sulle condizioni per diversi tipi di strutture. Tale normativa è anche chiamata Interstandard (2010).

Asia

- Cina: la Cina ha il proprio codice SHM nazionale⁴¹ a seguito della promulgazione del codice tecnico per il monitoraggio delle strutture di edifici e ponti (GB 50982-2014)⁴². Si tratta di un codice esclusivo con requisiti obbligatori per il monitoraggio della salute strutturale di edifici e ponti in Cina. Questo codice copre la maggior parte dei metodi di monitoraggio sul campo e stabilisce i corrispondenti parametri tecnici per il monitoraggio di grattacieli, strutture spaziali di grandi dimensioni, ponti e strutture isolate. Questo codice di progettazione per i sistemi SHM è il primo documento relativo al monitoraggio strutturale di un governo nazionale che imponga l'installazione di sensori sui ponti autostradali. Nessun altro standard ha la stessa rilevanza legislativa di tale codice, approvato dal Ministero dei Trasporti cinese.
- Cambogia: sono state istituite le nuove linee guida per il controllo delle strutture, il Bridge Inspection Manual, in Cambogia per il monitoraggio dei ponti. Nel manuale sono illustrate passo dopo passo le procedure da adottare per un corretto monitoraggio, con distinzione nella tipologia e nel materiale del ponte.

Oceania

⁴⁰ Wenzel, H. Health monitoring of bridges. Chichester: John Wiley & Sons, 2009

⁴¹ Yang, Y, Li, QS, Liu, G. Application and analysis of Technical code for monitoring of building and bridge structures GB50982-2014. Beijing, China: China Building Industry Press, 2016 (in Chinese).

⁴² GB 50982-2014 . Technical code for monitoring of building and bridge structures (in Chinese).

- Australia: la rete australiana di SHM (ANSHM) è stata costituita nel 2009 per migliorare lo sviluppo di SHM e la ricerca nazionale e internazionale, aumentare la consapevolezza sul valore di SHM in Australia. Gli articoli pubblicati dall'ANSHM discutono le diverse componenti coinvolte nell'SHM.

Gli standard SHM di queste istituzioni (eccetto il cinese) non sono obbligatori e governativi ma forniscono istruzioni normative per l'implementazione di codici SHM.

In conclusione, è da rimarcare il divario esistente tra ricerca e applicazioni pratiche di SHM dovuto alla mancanza di una standardizzazione completa dei principi del monitoraggio strutturale, come risulta chiaro in Italia.

1.4 Controllo e monitoraggio come metodi diagnostici

Il seguente paragrafo si propone di inquadrare il controllo e il monitoraggio nell'ambito della diagnostica, definendone ruoli ed applicazioni allo stato pratico; si mira alla contestualizzazione di queste due tecniche con cui la diagnostica trova applicazione, intese come aspetti della stessa branca ai fini di tale elaborato.

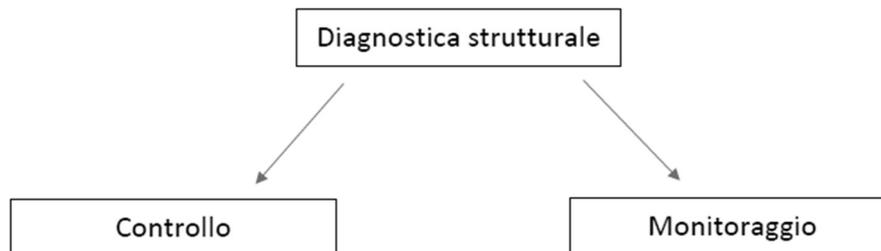


Figura 1.8. Schema concettuale su cui si basa la trattazione: Controllo e Monitoraggio come modalità di Diagnostica strutturale

Da un lato si pone il *controllo* del manufatto, pratica basata sui metodi di indagine necessari alla verifica del livello prestazionale di un sistema e all'identificazione dell'eventuale danno strutturale. Negli ultimi anni, alle ormai consolidate procedure di controllo strutturale si è affiancata la pratica del *monitoraggio*; per rendere l'idea, esso si configura come un controllo continuo. Nel complesso ne deriva una integrazione delle informazioni che opportunamente trattata consente la gestione ottimizzata del manufatto.

I controlli distruttivi e non distruttivi classici aumentano la conoscenza del manufatto, per quanto riguarda le proprietà meccaniche dei materiali, i particolari costruttivi e così via, ma spesso non sono sufficienti per la piena comprensione del comportamento strutturale e non sempre forniscono una conoscenza affidabile del manufatto. Le incertezze associate alla modellazione strutturale sono molteplici e rischiano di generare un modello FEM, che riproduce il comportamento dell'opera e necessario per progettare gli interventi strutturali, non attinente alla struttura reale. Questo problema viene risolto dal monitoraggio strutturale, che consente

di conoscere i parametri della struttura e di calibrare conseguentemente il modello numerico sulla base delle misure rilevate.

Altro aspetto rilevante è che i metodi di controllo rappresentano strumenti e sistemi per la valutazione *una tantum* dello stato della struttura⁴³, secondo le prescrizioni del piano di manutenzione. L'esigenza di mantenere standard di sicurezza duraturi, mista al raggiungimento di prestazioni elevate, sono i fautori della diffusione della pratica del monitoraggio strutturale. La principale differenza sta nel fatto che il fine del monitoraggio non è la ricerca di un difetto, bensì la valutazione dell'evoluzione temporale di un parametro caratterizzante il comportamento globale della struttura. Ciò consente il controllo in tempo reale del comportamento strutturale. Inoltre, il monitoraggio permette l'individuazione di anomalie nel comportamento del manufatto, garantendo la messa in opera di sistemi di approfondimento del problema.

Tuttavia, attualmente il monitoraggio non è in grado di ottemperare a tutte le esigenze di un controllo efficiente; ciò rende necessario il supporto di ispezioni e indagini di dettaglio. A differenza di altri settori, tra cui l'aeronautico, il settore delle costruzioni presenta ritardi in materia di monitoraggio. Le cause sono da ricercarsi nella specificità di ogni costruzione e delle sue problematiche che rendono impossibile l'automatizzazione di sistemi di monitoraggio, rendendo indispensabile l'intervento umano.

In tale contesto si evidenzia come controllo e monitoraggio non possano prescindere l'uno dall'altro. L'ottimale mantenimento di un'opera richiede sia periodiche ispezioni di ricerca di difetti sia sistemi per il monitoraggio del comportamento. Le ispezioni consentono di eseguire una indagine sui meccanismi degradanti in atto, mentre il monitoraggio permette di cogliere eventuali malfunzionamenti meritevoli di apprendimenti.

⁴³ F. Manzone, "Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici" – §5: Monitoraggio delle strutture

Capitolo 2

Controllo dell'opera

2.1 Introduzione

I principali fattori da cui deriva l'esigenza di valutare il grado di integrità strutturale ed il livello di degrado del manufatto⁴⁴ sono l'accertamento del grado di vulnerabilità e del grado di sicurezza, la verifica dell'efficacia di un intervento di riparazione o miglioramento, il monitoraggio del comportamento a lungo termine della struttura e dei materiali.

Durante il processo diagnostico per la definizione dello stato di salute di un manufatto è necessario calibrare il livello di approfondimento e i metodi più idonei in maniera specifica, in funzione delle peculiarità del manufatto indagato, in termini di rilevanza economica, sociale, storica e tipologia strutturale. Le fasi su cui si fonda questo processo finalizzato all'emissione di una idonea diagnosi su vulnerabilità e degrado delle strutture sono riconducibili a tre:

1. Sopralluogo:

consiste in un attento e critico esame visivo accompagnato dalla raccolta di dati e dall'analisi della documentazione esistente. Queste informazioni sono fondamentali per l'individuazione della posizione del manufatto in cui eseguire le indagini (fase 2). È in tale fase che deve eseguirsi la valutazione dell'esigenza di attivare un sistema di monitoraggio strutturale. Sostanzialmente tale fase può essere identificata nella *pre-diagnosi* o diagnosi preliminare dei dissesti, in cui complessivamente si svolgono l'analisi storico-critica e il rilievo e vengono identificate le azioni.

2. Progetto delle indagini o piano della sperimentazione:

le precedenti informazioni opportunamente ricavate sono in genere sufficienti per guidare il tecnico coinvolto nella presa di decisioni in merito all'esecuzione di indagini non distruttive e mirate prove di laboratorio. La progettazione di una corretta campagna di indagini influenza fortemente il livello di conoscenza che può essere raggiunto su cui si basa il modello strutturale

⁴⁴ Pucinotti R., *Criteri per la progettazione di operazioni di diagnosi strutturale*, Atti conferenza nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio e Diagnostica, Ravenna, 10° Congresso Nazionale dell'AIPnD, pagg. 253-261, 2003

usato per la valutazione della sicurezza. Il piano delle indagini sarà parte del progetto di intervento sull'opera e dovrà essere redatto sulla base delle motivazioni e degli obiettivi delle indagini stesse. In questa fase, inoltre, è richiesta la progettazione del monitoraggio strutturale, se questo si ritiene necessario in fase 1.

3. Svolgimento delle indagini:

si provvede all'esecuzione delle indagini e prove di laboratorio in precedenza pianificate. In particolare, le prove di laboratorio mirano a fornire indicazioni sulle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali.

Dopo queste tre fasi, il tecnico incaricato è in grado di pronunciarsi sulla diagnosi, risultato dell'analisi e studio della documentazione raccolta, dei risultati e delle misure delle indagini in situ e in laboratorio. Questa è la fase diagnostica vera e propria, mirata all'individuazione delle cause di degrado e/o dissesto; a tal fine è bene distinguere il caso di dissesti immediatamente identificabili dal caso di dissesti complessi da identificare e da decifrare. Si procede quindi con le seguenti operazioni:

a) Indicazione delle cause perturbatrici:

una prima ipotesi di dissesto viene formulata e si verifica la sua conferma sulla base dei dati raccolti in precedenza. In caso positivo, si accetta l'ipotesi di cause disturbatrici; altrimenti, si rende necessaria la formulazione di una nuova ipotesi. E così via, in modo iterativo, sino all'ottenimento di risultati soddisfacenti.

b) Valutazione delle condizioni di sicurezza:

impiegando i risultati delle prove eseguite.

c) Progettazione degli eventuali interventi di rinforzo.

In sintesi, in queste fasi che costituiscono il processo diagnostico, il tecnico che si occupa del controllo del manufatto indagato trova nelle indagini non distruttive o semi-distruttive uno strumento di assistenza fondamentale. Le modalità con cui i controlli sulle strutture trovano applicazione sono infatti rappresentate dai metodi di indagine strutturale, nella pratica attuati principalmente nell'ambito del piano di manutenzione.

2.2 Metodi di indagine sperimentale

2.2.1 Generalità

Il controllo di un'opera ha come obiettivo primario l'accertamento dello stato di salute dell'opera stessa nel tempo. Il tecnico che ha tale incarico può usufruire di una serie di strumenti e metodi di indagine a carattere sperimentale per la ricerca di uno stato di alterazione delle strutture (danneggiamento) o la determinazione delle caratteristiche geometriche delle strutture in assenza di dati progettuali. Questi metodi si fondano sulla comprensione delle cause a monte di un fenomeno di degrado e sono preliminari all'intervento per la risoluzione

del problema. In generale, essi prevedono la determinazione di un parametro tramite strumentazione e la definizione della relazione che questo parametro può avere con le variabili dello stato dell'opera, ossia grandezze rappresentative delle caratteristiche globali della stessa.

Il contesto entro cui i metodi di indagine trovano applicazione è rappresentato dall'iter per la valutazione della sicurezza di una costruzione esistente⁴⁵, il quale consta di:

1. Analisi storico-critica;
2. Rilievo;
3. Caratterizzazione meccanica dei materiali;
4. Livelli di conoscenza e fattori di confidenza;
5. Azioni.

In tale procedura, il secondo e il terzo punto risultano i più attinenti all'indagine sulle strutture, cioè la parte relativa al processo conoscitivo imposto dalla normativa vigente.

L'indagine vera e propria è caratterizzata per prima cosa dalla definizione delle proprietà geometriche della struttura: sono infatti frequenti i casi di costruzioni storiche prive di indicazioni progettuali. Il problema si fa serio nelle strutture in C.A., dove la collocazione e disposizione delle armature influenza pesantemente la resistenza. A tal proposito, metodi di investigazione strutturale consentono la ricostruzione della geometria della sezione e delle sue componenti, invisibili all'esterno.

I metodi di indagine mirano all'identificazione e quantificazione, in termini di portata, di un processo di degrado in atto sulla struttura. La scelta del metodo di indagine più adatto dipende da svariati fattori⁴⁶:

- Caratteristiche dell'opera e del contesto;
- Analisi costi-benefici;
- Studi di compatibilità tecnica;
- Grandezze significative in relazione all'obiettivo dell'indagine;
- Affidabilità nella determinazione dei parametri;
- Carattere di invasività del controllo.

In relazione a quest'ultima, i sistemi possono essere suddivisi in:

- Metodi a bassa invasività:
rientrano in tale categoria le *prove non distruttive* (NDT) e tutte le tecniche, come il controllo visivo, che non prevedono il danneggiamento della struttura.
- Metodi a media invasività:
prevedono un danneggiamento strutturale minimo e comunque prontamente riparabile. Un esempio è la prova di estrazione pull-out.
- Metodi ad alta invasività:
prevedono l'estrazione e la rottura di provino. Su tutti, il carotaggio.

⁴⁵ Norme Tecniche per le Costruzioni, §8: *Costruzioni esistenti*; §8.5: *Definizione del modello di riferimento per le analisi*

⁴⁶ Manzone F., "Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici" - §4: *Metodi di indagine strutturale*

La suddetta affidabilità è associata alla diversa invasività. È bene in tal senso distinguere la *stima* dalla *determinazione*. Si parla di stima se la variabile viene ottenuta per mezzo di correlazioni con altri parametri; la determinazione del parametro è invece propriamente associata ad una prova diretta, quindi distruttiva.

È possibile concludere che generalmente i metodi non distruttivi vengono impiegati per aumentare la densità delle misure, le quali, per ottemperare al requisito di affidabilità, non possono fare a meno delle prove dirette, seppure più costose e invasive.

2.2.2 Tecniche di indagine globale

L'analisi dei diversi controlli sulle strutture e di conseguenza dei metodi di indagine strutturale ha inizio dalle tecniche di indagine globale. In modo particolare, l'attenzione viene fissata sul sopraccitato controllo visivo (esame visivo o, ancora, ispezione visiva), sull'indagine endoscopica e sull'analisi termografica. Le tecniche di indagine globale risultano interessanti nell'ambito del controllo in quanto in esse le principali caratteristiche richieste ad un sistema di indagine trovano un compromesso: bassa invasività, relativamente ridotto costo di attuazione, semplicità di esecuzione ed interpretazione, affidabilità. In altri termini, queste caratteristiche le rendono particolarmente idonee per l'attuazione dei piani di manutenzione, in cui sono previsti controlli da ripetere periodicamente, di pratica applicabilità e compatibilità con l'uso del manufatto.

1. Controllo visivo:

L'ispezione visiva è il controllo che meglio risponde ai suddetti requisiti. Essa consente di svolgere un'indagine rapida e complessiva del manufatto e delle sue parti, con la possibilità di identificare segnali che rappresentano i sintomi premonitori di possibili problemi più gravi. Se svolto da personale esperto e qualificato, l'esame visivo è difatti uno dei principali metodi di indagine e il fatto che non sia previsto l'impiego di strumenti specifici favorisce a renderlo tale. Non a caso, se tale controllo è coadiuvato dal rilievo strutturale e da un dossier fotografico, rappresenta la prima fase fondamentale di individuazione dei processi di dissesto. Quindi, è bene che il costruito sia regolarmente oggetto di prevenzione svolta da un occhio esperto e attento, in grado di comprendere i processi in atto e, se necessario, disporre provvedimenti. L'esempio a cui si fa riferimento è rappresentato dall'esame dello stato fessurativo di un elemento in calcestruzzo armato. Come evidenziato dal seguente schema⁴⁷, tratto dal relativo bollettino CIB, e dalla relativa tabella, l'identificazione del quadro fessurativo è molto importante nell'individuazione dell'eventuale tipo di dissesto in corso. In questo caso l'ispezione visiva mira al riconoscimento del tipo di fessurazione eventualmente esistente e alla successiva comprensione delle sue cause.

⁴⁷ Non-Structural Cracks in Concrete – Concrete Society Technical Report No.22 – 3rd edition, 1992

Lettera	Tipo di fessura
A	Cedimento plastico sull'armatura
B	Cedimento plastico per curvatura
C	Cedimento plastico per dislivello
D	Ritiro plastico diagonale
E	Ritiro plastico casuale
F	Ritiro plastico sull'armatura
G	Effetto termico - vincolo esterno
H	Effetto termico - vincolo interno
I	Ritiro igrometrico
J	Crepe contro cassero
K	Crepe per CLS a sbalzo
L	Corrosione naturale dell'armatura
M	Corrosione dell'armatura per cloruri di calcio
N	Reazione alcali-aggregati

Figura 2.1. Classificazione dei crack - report CIB

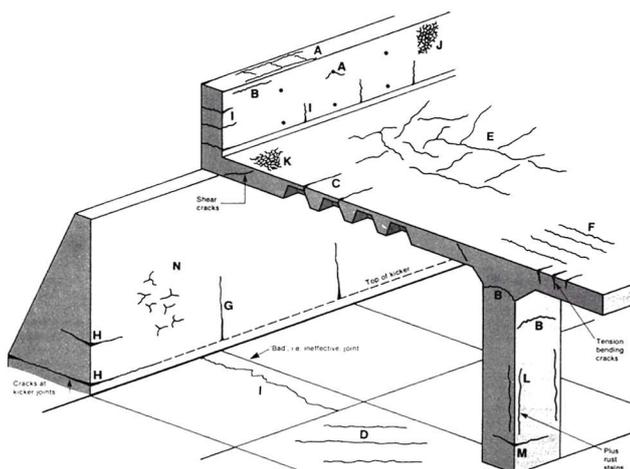


Figura 2.2. Schema relativo alla classificazione dei crack da report CIB

Le informazioni derivanti dall'esame visivo e dalla collezione di dati storici risultano in genere sufficienti per la definizione delle indagini, distruttive e non, da eseguire; in questo modo è possibile ottimizzare il numero e tipo di indagini da svolgere, minimizzare i costi, capire se è necessaria l'attuazione di un sistema di monitoraggio della struttura (nel caso di processi di dissesto in evoluzione).

D'altra parte, il controllo visivo ha dei limiti ben evidenti, che riguardano l'impossibilità di raggiungere le zone inaccessibili: zone di interesse come nodi, parti interessate da impermeabilizzazioni o rivestimenti. Il crescente interesse nei confronti di questo controllo ha però fatto sì che si sviluppassero tecniche endoscopiche, proprio per ovviare al raggiungimento di punti nascosti del manufatto.

2. Indagine endoscopica:

tecnica che consiste nell'attuazione di un esame visivo opportunamente strumentato con l'obiettivo di raggiungere spazi inaccessibili in diverso modo. La strumentazione è costituita da una telecamera di dimensioni molto ridotte, dotata di sorgente di illuminazione integrata, collegata tramite un cavo flessibile, che può essere modellato per entrare anche negli spazi più angusti, ad un monitor che restituisce le sequenze riprese.

In aggiunta, le immagini sono oggetto di memorizzazione e processamento istantaneo finalizzato a determinare, ad esempio, la distanza tra il punto di ripresa e l'oggetto.

3. Analisi termografica:

la filosofia su cui si basa è la stessa della precedente indagine, dato che l'analisi termografica è un metodo di analisi globale che riguarda l'osservazione di fenomeni non indagabili ad occhio nudo. Infatti, tale tecnica viene eseguita attraverso termocamera, un dispositivo che consente di ottenere la mappatura termica dell'elemento che viene ripreso. Una tipica applicazione riguarda la lettura della struttura, nascosta sotto i tamponamenti o tra di essi: la rappresentazione a colori che associa diversi colori per i diversi valori del parametro termico misurato, associata alla foto scattata, consente di riconoscere la struttura. In sostanza, si procede per confronto, sfruttando il ponte termico, ossia la differenza di temperatura tra l'elemento in C.A. della struttura e i tamponamenti, per evidenziare, da considerazioni sulla discontinuità dei

flussi termici negli elementi, la struttura. Tuttavia, sebbene tale tecnica consenta lo studio della struttura senza eseguire alcuna prova distruttiva, è sempre meglio svolgere localmente qualche prova distruttiva.

2.2.3 Prove non distruttive

La prima fase vera e propria di sperimentazione per la definizione dei parametri da assumere nell'analisi strutturale per la valutazione della sicurezza è rappresentata dall'attuazione di prove non distruttive (o NDT – Non-Destructive Testing).

Sono numerosi i metodi non distruttivi che negli ultimi anni sono stati perfezionati e impiegati nella valutazione del degrado e del livello di sicurezza; alcuni di questi hanno le proprie radici in altre discipline scientifiche, come la medicina.

I metodi di prova non distruttivi disponibili sono svariati e vengono classificati principalmente in base alle proprietà sotto investigazione (resistenza del calcestruzzo, corrosione dell'acciaio, durabilità e degrado, integrità e prestazioni, ecc.) e al tipo di attrezzatura (elettrochimico, elettrico, meccanico, idraulico, infrarosso, ecc.). Di seguito vengono proposti i principali metodi non distruttivi ad oggi disponibili.

Prova pacometrica

È la prima indagine attuata sulle strutture in calcestruzzo armato, svolta sulla sua superficie; infatti tale prova consente di risalire alla posizione delle armature nella sezione e le altre tecniche di indagine risultano influenzate dalla presenza della barra. Lo strumento utilizzato è il pacometro (anche detto covermeter o rebar locator), il quale sfrutta un metodo elettromagnetico per misurare il copriferro e l'ubicazione delle barre d'acciaio nel calcestruzzo. Un display digitale durante la scansione, ossia il moto del sensore, mostra l'entità del copriferro e il diametro della barra: in corrispondenza di essa si verifica infatti un segnale acustico e luminoso. La procedura prevede l'esecuzione di scansioni, muovendo il sensore in orizzontale e in verticale rispettivamente, sulla superficie del calcestruzzo. La scansione in verticale consente di definire la posizione delle barre orizzontali, mentre la scansione in orizzontale permette di individuare la posizione delle barre verticali. In questo modo è possibile, con l'ausilio di un sistema di riferimento, tracciare la griglia delle barre nell'elemento in C.A. in analisi.



Figura 2.3. Applicazione del pacometro⁴⁸

Prova sclerometrica

Si tratta di una prova per la valutazione della durezza superficiale degli elementi in calcestruzzo armato. La prova, come la precedente, deve il suo nome allo strumento utilizzato, lo sclerometro (anche detto rebound hammer test o martello di Schmidt). La profondità di investigazione è la più ridotta, pari a circa $2 \div 3$ cm. La lettura che viene fornita, ossia la misura, è l'indice di rimbalzo, utilizzabile per differenti applicazioni.

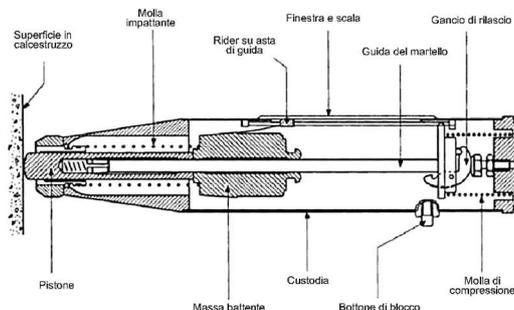


Figura 2.4. Rappresentazione schematica dello sclerometro tipo⁴⁹

La procedura prevede che il pistone venga pressato contro la superficie in calcestruzzo: l'angolo che il pistone forma con la superficie deve essere sempre di 90° . Di conseguenza, il pistone viene ritratto, la molla si allunga e la massa si allontana sino ad un certo punto (fine corsa della guida del martello); la massa viene quindi bloccata. Se la pressione dell'operatore aumenta, il sistema di sblocco fa sì che la massa sia libera di muoversi verso la superficie. Si verifica così l'impatto della massa contro la superficie per mezzo del pistone; la massa tende a rimbalzare sul pilota lungo l'asta di guida, a causa dell'energia rilasciata dal calcestruzzo. È infine possibile leggere ed annotare l'indice di rimbalzo, bloccando il rider nella sua posizione della scala, premendo il bottone di blocco.

La teoria che sta alla base della prova si fonda sul principio che il rimbalzo di una massa elastica dipenda dalla durezza della superficie; da qui è possibile ricavare informazioni sulla durezza relativa dello strato corticale di calcestruzzo.

Per quanto riguarda le applicazioni della prova, esse possono essere ricondotte a tre categorie:

1. Controllo dell'uniformità di qualità del calcestruzzo nell'industria di prefabbricazione;
2. Confronto di un dato calcestruzzo con un requisito specificato;

^{48 49} Foto derivate dal libro "Testing of Concrete in Structures", John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione.

3. Stima della resistenza a compressione del calcestruzzo: applicazione comune ma poco attendibile. Necessita di tarature, basata su carotaggio, come da EN 13791.

Prove ultrasoniche

Vengono anche definite pulse velocity test o prova di velocità dell'impulso. Si applicano alle strutture in calcestruzzo armato, a quelle in acciaio e a quelle in legno. L'attrezzatura è costituita da due sonde (una ricevente e l'altra trasmittente) collegate tra di loro per determinare, tramite contatore elettronico, il tempo tra la trasmissione dell'impulso elettronicamente generato dalla sonda trasmittente e la ricezione da parte della sonda ricevente. L'output della prova è rappresentato quindi dal tempo di percorrenza dell'impulso. Nota la lunghezza del percorso dell'impulso nel calcestruzzo, si ricava la velocità:

$$V = \frac{\Delta L}{\Delta t_{T-R}} \quad (2.1)$$

in cui:

- V velocità dell'impulso nel mezzo [km/s]
- ΔL percorso dell'impulso nel mezzo [km]
- Δt_{T-R} tempo tra trasmissione e ricezione dell'impulso [s]

Nota la velocità è possibile valutare la qualità del calcestruzzo.

La prova può svolgersi secondo metodi differenti, in funzione della posizione relativa delle due sonde:

- (a) Metodo diretto:

le due sonde vengono collocate allo stesso livello su due facce opposte dell'elemento. È il metodo più attendibile in quanto associato alla massima energia dell'impulso e il percorso risulta chiaro, coincidente con lo spessore dell'elemento.

- (b) Metodo semi-diretto:

le sonde vengono collocate su due facce adiacenti. Si utilizza quando il metodo diretto non è disponibile e solo se la lunghezza del percorso non è eccessiva.

- (c) Metodo indiretto:

le sonde vengono posizionate sulla stessa faccia. Si applica nel caso di muri di sostegno, pavimentazioni e tutti quei casi in cui solo una superficie risulta disponibile. È il metodo meno soddisfacente in quanto l'ampiezza del segnale ricevuto può essere minore del 3% di quella associata al metodo diretto.

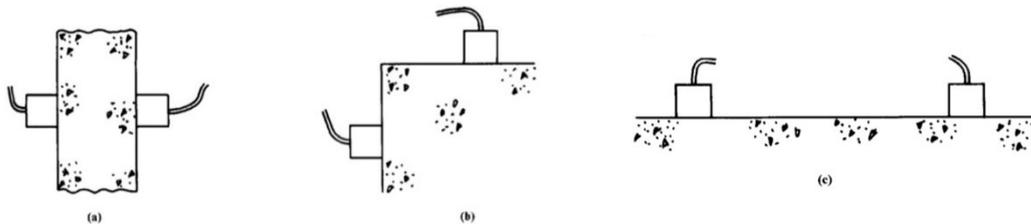


Figura 2.5. Schema dei metodi di prova agli ultrasuoni⁵⁰

⁵⁰ Foto derivate dal libro "Testing of Concrete in Structures", John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione.

La teoria di base si fonda sul fatto che la velocità dell'impulso risulti associata alle proprietà del mezzo attraversato:

- Proprietà meccaniche: E_d e ν ;
- Proprietà fisiche: ρ .

Infatti, per un mezzo omogeneo, isotropo ed elastico-lineare vale:

$$V = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}} \quad (2.2)$$

Da cui è possibile scrivere le proprietà meccaniche in funzione della velocità dell'impulso:

$$E_d = \frac{\rho \cdot V^2}{K} \quad (2.3)$$

in cui:

V	velocità dell'impulso nel mezzo [km/s]
E_d	modulo di elasticità secante dinamico [MPa]
ρ	densità [kg/m ³]
K	costante, funzione del modulo di Poisson ν

La prova con gli ultrasuoni è molto utile anche a fini di calcolo pratico: consente, infatti, di calcolare lo spessore dello strato danneggiato di calcestruzzo (ad esempio a seguito di incendio) e la profondità di fessurazione del calcestruzzo stesso.

Un'operazione importante è rappresentata dall'accoppiamento (o coupling) tra la faccia di calcestruzzo e ciascuna sonda. Esso viene realizzato tramite uno strato sottile di mastice. Inoltre ciascun operatore (in genere uno per sonda) esercita una certa pressione per un miglior accoppiamento. Ciò però fa sì che il risultato possa essere influenzato dal singolo operatore. È bene, quindi, usare sempre la stessa coppia di tecnici per le misure.

Si fa inoltre riferimento ad un altro metodo, definito metodo Sonreb, che consiste nell'unione delle informazioni derivanti da sclerometro e prove ultrasoniche. In aggiunta, per la taratura sono richieste anche prove distruttive, quale carotaggio.

Prova di carbonatazione

Come approfondito nel capitolo dedicato a *degrado e durabilità*, il calcestruzzo esposto all'atmosfera è soggetto alla carbonatazione, che comporta depassivazione con conseguente attivazione della corrosione dell'acciaio. La prova di carbonatazione mira a valutare l'entità dello strato di calcestruzzo carbonatato. Questa prova è la più semplice tra le prove chimiche. La procedura consiste nell'estrazione di una carota di materiale dall'elemento strutturale, la quale viene sottoposta alla prova di carbonatazione al fine di determinare la profondità di carbonatazione. La superficie di calcestruzzo viene trattata con una soluzione all'1% di fenolftaleina in etanolo. Si tratta di un test colorimetrico basato sulla variazione di colore della soluzione per pH intorno a 9.2: per valori più alti di pH, la soluzione cambia colore e vira verso un rosso porpora. La profondità di carbonatazione può essere valutata considerando che le zone carbonatate non cambiano colore, essendo l'ambiente diventato acido, mentre le zone non

carbonatate assumono un colore rosso porpora. In genere, per fissare un ordine di grandezza, una struttura di 40 anni presenta uno strato carbonatato di profondità intorno ai 20÷25 mm.

Prova di estrazione

È una prova parzialmente distruttiva, anche detta pull-out test o prova di estrazione di inserti, che si applica, con apposite specificazioni, alle strutture in C.A. e a quelle in muratura.

Per quanto riguarda il concetto di base, la prova consiste nella misurazione della forza necessaria per estrarre un tassello inserito in un foro eseguito nel materiale. La rottura, nel caso del calcestruzzo, è causata da fessurazione interna.

La procedura, nel caso di elemento in calcestruzzo, prevede la perforazione di un foro lungo 30÷35 mm, di diametro pari a 6 mm, tramite trapano a rotopercolazione e l'inserimento di un tassello da 6 mm con manicotto espandibile sino ad un livello di 20 mm nel materiale (fase 1). In questo modo si evita l'effetto della carbonatazione superficiale e si riduce l'interferenza dell'armatura. Ha quindi inizio la fase 2: si esercita una pressione crescente a velocità standard attraverso un martinetto manuale, che comporta un conseguente contrasto sulla superficie in calcestruzzo. In corrispondenza della rottura, si esegue la lettura della pressione di estrazione tramite manometro e tramite la curva di taratura del produttore si risale alla forza agente. L'estrazione è associata all'espulsione di un cono di materiale, intatto e attaccato al tassello. Si rende quindi necessario un intervento di ripristino del cono che è venuto meno con malta cementizia tixotropica.

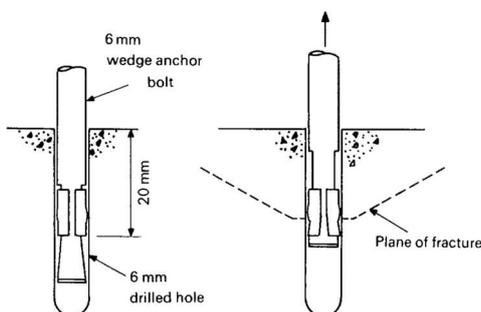


Figura 2.6. Rappresentazione schematica della prova di estrazione⁵¹: fase 1 e fase 2

Shove-test

Si tratta di una prova di taglio a media invasività che viene svolta sugli strati orizzontali di malta. È finalizzata alla determinazione della resistenza a taglio di un sistema costruttivo murario fatto di elementi artificiali e consiste nella determinazione della forza associata allo slittamento laterale di un elemento murario, a seguito del superamento della resistenza degli strati superiore ed inferiore di malta.

La procedura prevede la rimozione di un mattone per collocare un martinetto idraulico al suo posto e l'eliminazione di un giunto di malta, quello opposto al martinetto rispetto all'elemento in esame. Si realizza così un contrasto in corrispondenza della muratura rimanente sino allo slittamento nel piano del mattone. In tale condizione si determina la tensione tangenziale, da cui si ricava, a seguito di correzione, la stima della resistenza a taglio della muratura.

⁵¹ Foto derivate dal libro "Testing of Concrete in Structures", John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione

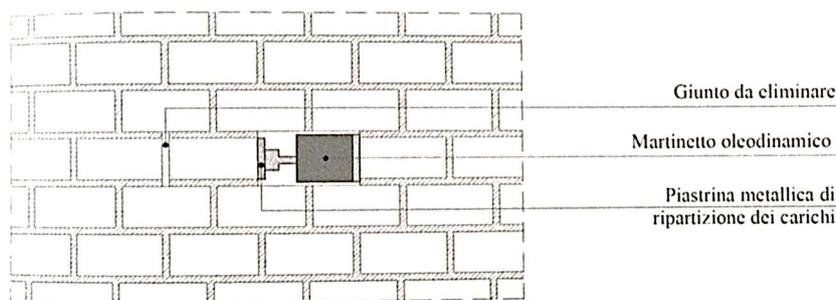


Figura 2.7. Schema di esecuzione "shove-test" su muratura⁵²

Prove con liquidi penetranti

Indagine sulle strutture in acciaio finalizzata all'individuazione di difetti dovuti alle proprietà del materiale e alle procedure che consentono l'assemblaggio dell'opera. In particolare, supponendo che il montaggio sia stato eseguito a regola d'arte, i meccanismi di degrado principali sono le cricche, ossia le discontinuità che nel tempo si dilatano. La seguente prova ha come obiettivo proprio l'individuazione di questi difetti, non visibili direttamente ad occhio nudo, per mezzo dell'uso di liquidi penetranti. Per quanto riguarda la procedura, si esegue la pulizia dell'elemento metallico e si applicano sulla sua superficie dei liquidi che penetrano per capillarità nelle piccole cricche. Si esegue quindi un'altra pulizia per rimuovere il liquido che non è penetrato nelle cricche. Per ultimo, si applica una sostanza rilevatrice che espanda il liquido per renderlo visibile. Inoltre, i liquidi penetranti hanno in genere colori forti o sono fluorescenti per essere facilmente individuabili.

Prove magnetoscopiche

Alternativa alla prova con liquidi penetranti, la prova magnetoscopica è simile ma di maggiore facilità. L'obiettivo è sempre rappresentato dalla ricerca di cricche, in tal caso però partendo da considerazioni sulle proprietà magnetiche dell'acciaio.

La procedura consta essenzialmente di due fasi. Nella prima fase si induce nell'elemento metallico un campo magnetico da fonte esterna. In ambito edile, tale fonte è rappresentata da un giogo portatile, cioè un magnete permanente a forma di ferro di cavallo. La seconda fase, dopo l'induzione, consiste nell'applicazione di una sostanza con particelle magnetiche sulla superficie; le particelle si dispongono secondo le linee di flusso del campo indotto. Il campo magnetico sarà influenzato dalle discontinuità, in corrispondenza delle quali si avrà una maggiore densità di particelle magnetiche. Infine, si procede con pulizia e smagnetizzazione della superficie dell'elemento trattato.

Prove radiografiche e gammagrafiche

La prova radiografica, o mammografica, è in grado di individuare difetti non solo sulla superficie dell'elemento metallico ma anche internamente, ricercando inclusioni di materiale o altri difetti interni. La prova consiste in una vera e propria mammografia del pezzo in esame, come accade per il corpo umano per l'individuazione delle fratture ossee. Per quanto riguarda la procedura, il materiale metallico viene investito da un fascio di radiazioni che dopo si imprime su una pellicola. Il materiale attraversato influenza l'intensità delle radiazioni: in

⁵² Manzone F., "Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici" - §4.4: Indagini sulle strutture in muratura

particolare, i difetti lasciano traccia con un diverso livello di colore nella pellicola. Le radiazioni possono essere di tipo x o di tipo γ . I limiti principali della prova sono legati alla sicurezza dell'operatore che ha a che fare con radiazioni, pericolose per l'uomo, e la reale efficacia solo per pezzi semplici geometricamente, dato che non è altrimenti facile distinguere le macchie dovute ad un difetto da quelle causate dall'attraversamento del pezzo da parte delle radiazioni.

Prove di penetrazione per strutture in legno

Il test penetrometrico è una delle poche prove che possono essere eseguite sul materiale ligneo per il controllo in esercizio; infatti, l'origine naturale del materiale influenza i metodi di prova attuabili.

La procedura consiste nell'inserimento di una sonda metallica nell'elemento in esame, determinando la resistenza alla penetrazione in funzione alla profondità. Il nome commerciale dello strumento per lo svolgimento della prova è "Resistograph", identificabile come una pistola da appoggiare alla superficie dell'elemento da analizzare, che spinge a velocità controllata la sonda. Allo stesso tempo, si misura la resistenza del legno, i dati vengono registrati e possono essere consultati in forma di grafico sul pc.

L'obiettivo della prova è rappresentato dall'individuazione di zona caratterizzate da consistenza ridotta, specie nel caso in cui si presentino all'interno dell'elemento senza evidenti segni in superficie. La perdita di consistenza del materiale è dovuta a tipi di degrado di natura biologica. Lo studio delle testate delle travi rappresenta una tipica e utile applicazione di tale prova, in quanto la ricerca delle zone deboli in queste sarebbe altrimenti inverosimile, poiché inaccessibili.

Microcarotaggio ligneo

La procedura consiste nell'esecuzione di un prelievo di materiale ligneo tramite l'uso del "succhiello di Pressler". Quest'ultimo è uno strumento che, tramite rotazione manuale, permette la penetrazione nel materiale, grazie alla sua punta filettata, e la raccolta del materiale accumulato, tramite la parte centrale forata. L'obiettivo della prova è quello di eseguire un esame visivo del campione raccolto dalla perforazione del legno, evidenziando gli strati più interni dell'elemento strutturale e verificando l'esigenza di altri provvedimenti.

2.2.4 Prove distruttive

Lavorando nell'ambito del controllo delle strutture è necessario tenere presente che l'affidabilità di un metodo è in genere direttamente proporzionale alla sua invasività e che la determinazione delle proprietà del materiale non può prescindere dall'attuazione di prove distruttive.

Le prove distruttive studiano il comportamento dei materiali sotto l'azione di carichi di natura differente. Con "prova distruttiva" si intende propriamente la prova di rottura eseguita in laboratorio con apposite macchine di prova, sebbene la sperimentazione includi anche la procedura di realizzazione/estrazione del provino. Questa sperimentazione viene definita fondamentale dalla normativa di riferimento, le NTC, ed è da svolgersi dopo le prove ad invasività

ridotta. Il provino estratto dalla struttura o il campione di materiale possono essere sottoposti a diverse prove, caratterizzate da diverse configurazioni di carico e procedure, standardizzate da norme europee EN. In particolare, vengono considerati la relazione tra la forza applicata e la deformazione rilevata e lo stress limite associato alla rottura.

Di seguito vengo esposte le due prove meccaniche distruttive per eccellenza per le strutture in calcestruzzo armato e per quelle in acciaio: rispettivamente, il carotaggio e la prova di trazione. Queste prove rivestono in generale una notevole importanza per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali.

Carotaggio e prove di laboratorio sul calcestruzzo

Il carotaggio è tra i principali metodi di prova eseguiti su strutture esistenti, nonché il principale metodo per l'estrazione di provini da una struttura in opera. Consiste infatti nell'estrazione di carote di calcestruzzo, ossia provini cilindrici in calcestruzzo, dall'elemento. In quanto tale, non rappresenta tanto un metodo di indagine, quanto un'operazione preliminare per lo svolgimento delle prove di laboratorio. Dato che il carotaggio prevede l'asportazione di materiale dalla struttura, costituisce un metodo ad alta invasività che necessita di ripristino. Le limitazioni del carotaggio sono legate al danneggiamento introdotto alla struttura, per l'appunto, al costo e alla natura puntuale e localizzata dei risultati. Per questo motivo, le carote vengono in genere associate a sclerometro e ultrasuoni.

Il riferimento normativo principale per il carotaggio è rappresentato dalla norma EN 12504⁵³, la quale si occupa, tra le altre cose, della procedura per l'esecuzione del carotaggio stesso. Come operazione preliminare, è necessario utilizzare un pacometro per determinare la posizione delle barre di armatura su una griglia e fissare, di conseguenza, la location dell'estrazione. È possibile quindi svolgere l'estrazione della carota in calcestruzzo dall'elemento, tramite perforazione per mezzo di un trapano a punta diamantata; quest'ultimo viene vincolato alla struttura in calcestruzzo, perpendicolarmente alla sua superficie e pressato al fine di evitare carote rotte o distorte a causa di spostamenti relativi. Una volta che è stata fresata una adeguata profondità, la macchina da taglio viene estratta dalla struttura: la carota è ancora all'interno dell'elemento in calcestruzzo, con la sua estremità interna ancora connessa allo stesso. L'elemento viene quindi tirato fuori in modi differenti: tramite uno scalpello, fatto entrare lateralmente, oppure tramite un trapano, facendo un foro al centro della carota per poterla estrarre. Il buco lasciato dalla carota viene ripristinato con malta cementizia di tipo colabile autolivellante, con posa di piccolo cassero. Subito dopo l'estrazione, la carota va contrassegnata per l'identificazione. Stimato l'eccesso di vuoti per mezzo di confronto dei vuoti esposti alla superficie di taglio con fotografie di riferimento, le carote vengono avvolte con pellicola trasparente per preservarne l'umidità e inviate in laboratorio.

⁵³ Norma UNI EN 12504: Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione

In laboratorio la carota viene innanzitutto sottoposta alla preparazione per la sperimentazione: si esegue la rettifica per molatura. In questo modo si eliminano le zone disturbate, evitando che possano influenzare la prova. Le carote vengono tagliate per molatura e rettifica, al fine di avere estremità piane e perpendicolari all'asse della carota e ottenere elementi della lunghezza necessaria. Una volta determinata la densità del calcestruzzo indurito, è possibile eseguire la prova di laboratorio.

Le prove di laboratorio rappresentano il reale momento di indagine sulla struttura. Le prove più comuni sono la prova di carbonatazione (già trattata) e la prova di compressione a rottura. Quest'ultima mira a determinare la resistenza a compressione del calcestruzzo della carota e, quindi, del calcestruzzo in situ. La prova, anche detta di schiacciamento, viene svolta tramite pressa, ad una velocità di carico costante pari a 0.6 ± 0.2 MPa/s. Dalla lettura della forza raggiunta alla rottura, ossia la forza massima, viene eseguita la valutazione indiretta della resistenza del calcestruzzo, dividendo la forza massima per l'area pre-prova. In aggiunta, l'ispezione visiva del provino a rottura fornisce importanti indicazioni sulla qualità del calcestruzzo. Le rotture adeguate del cubo sono evidenziate da fessure verticali sulle facce verticali e sono omogenee. Le fessure rimangono fino alla fine o danno origine ad una coppia di piramidi. Inoltre, in caso positivo, il danneggiamento delle quattro facce è analogo mentre il danno delle facce a contatto con le piastre è ridotto.

Altre prove di laboratorio presenti in letteratura sulle carote riguardano la determinazione della resistenza a trazione del calcestruzzo e la determinazione del modulo statico di elasticità in compressione. Nel primo caso la carota viene sottoposta alla prova brasiliana (anche detto splitting test): questa prevede un carico lineare di compressione a velocità di carico costante (0.04 ± 0.06 MPa/s) sino a rottura e conseguente determinazione della resistenza a trazione indiretta. La seconda prova invece, per il modulo elastico, può essere attuata secondo due diversi metodi, che differiscono solo per la storia di carico a cui è soggetta la carota. Il metodo A prevede due successioni da tre cicli di carico, mentre il metodo B una successione unica.

Prove di laboratorio sul materiale acciaio

La *prova di trazione* è la più importante tra le prove meccaniche distruttive. A livello di materiali metallici, essa viene disciplinata dalla norma EN 10002 (Materiali metallici – prova di trazione), mentre specificatamente per le barre di armatura ci si riferisce alla UNI EN 10080, riguardante l'acciaio saldabile per cemento armato. L'operazione preliminare alla prova di trazione uniassiale è rappresentata dall'identificazione del fornitore. Questa avviene per mezzo di un marchio, anche dato nell'attestato di qualificazione, a partire dal quale è possibile risalire allo stabilimento in cui è stato prodotto l'acciaio in questione. Nel caso di barra di armatura, è necessario svolgere la determinazione del diametro effettivo dalla misurazione di lunghezza e massa e la preparazione della prova, tramite taglio e punzonatura della barra. In linea generale, il provino in acciaio si ottiene dalla lavorazione meccanica di un saggio derivante da un

prodotto, presenta sezione circolare o rettangolare e in esso si distinguono un tratto a sezione costante (contenente il tratto utile) e due teste (afferraggi). La macchina di prova è una macchina idraulica o elettromeccanica, universale. Per la valutazione dell'allungamento del provino si montano estensimetri. In genere, la prova prevede che si usino velocità differenti nelle diverse fasi. La forza assiale di trazione aumenta: in una prima fase, la fase elastica, la prova viene eseguita in controllo di forza, mentre successivamente la prova continua in controllo di spostamento, usando la corsa della macchina per introdurre la forza. Raggiunta la tensione massima nella sezione localizzata si verifica la rottura dell'acciaio.

Durante l'intera prova di trazione è possibile osservare l'evoluzione del diagramma σ - ε in tempo reale. Dal trattamento di tale diagramma è possibile ricavare le caratteristiche del materiale indagato.

I risultati della prova infatti riguardano la deformabilità e la resistenza. Per quanto concerne la deformabilità, i parametri ricavati sono in genere il modulo elastico e l'allungamento percentuale plastico e totale; mentre, dal punto di vista della resistenza, l'obiettivo è determinare le tensioni di snervamento e massima. A tal fine, da grafico si determinano le forze associate a questi due fenomeni e da esse si ricavano le corrispondenti tensioni, dividendo per la sezione del provino. Infine, la modalità di rottura fornisce indicazioni sulla duttilità del materiale.

Nel caso di calcestruzzo armato, un'altra prova che presenta una grande importanza è rappresentata dalla *prova di aderenza*. L'aderenza tra armatura e calcestruzzo è infatti un aspetto fondamentale per il calcestruzzo armato, come testimoniato dal divieto fatto di impiego di barre a superficie liscia per le strutture. In letteratura ci sono diversi metodi per la valutazione della capacità di aderenza, per l'omologazione dell'acciaio. Tra queste, vi è la prova di aderenza o beam test, standardizzata dalla RILEM e richiamata dalle NTC. Per quanto riguarda il principio di tale prova e la sua esecuzione, il test viene svolto su un provino formato da due parti prismatiche in calcestruzzo appositamente armate per prevenire fessurazione e splitting. Queste due parti prismatiche sono interconnesse inferiormente dalla barra passante sotto analisi e superiormente tramite cerniera in acciaio. La normativa di riferimento, anche in questo caso la EN 10080, definisce le dimensioni di blocchi e cerniera; in particolare si hanno due tipi di indicazioni geometriche (tipo A e tipo B) in base al diametro della barra indagata.

Per quanto riguarda la connessione barra-calcestruzzo, si ha aderenza tra i due materiali solo nella zona centrale di ogni blocco, per una lunghezza pari a 10 volte il diametro della barra; al di fuori, l'aderenza è eliminata tramite l'interposizione di un manicotto. Il provino è soggetto a due carichi simmetrici, per cui la configurazione di prova è di flessione su quattro punti.

Il carico viene applicato tramite incrementi successivi di 80 MPa ciascuno, sino alla rottura del provino. Essa è una rottura per aderenza e si verifica quando si ha scorrimento dell'acciaio rispetto al calcestruzzo ad entrambe le estremità della barra: l'acciaio perde completamente la

sua capacità di aderenza al calcestruzzo. Infatti, per determinare lo spostamento tra blocco in CLS e barra in acciaio si introduce un trasduttore di spostamento, ricordando che nelle zone dei manicotti l'acciaio è in contatto strisciante rispetto al CLS.

Secondo le NTC, infine, la tensione di aderenza media e quella massima devono essere maggiori dei rispettivi limiti imposti da norma, dove la tensione di aderenza media è data dalla media delle tensioni di aderenza corrispondenti a scorrimenti di 0.01mm, 0.1mm e 1mm, mentre la tensione di aderenza massima è quella associata alla forza massima.

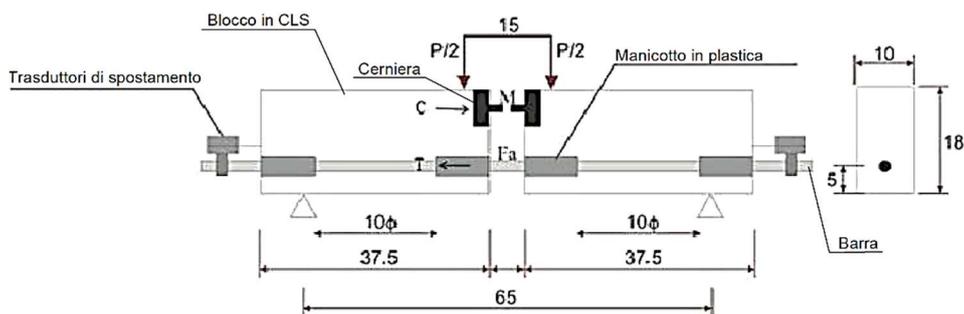


Figura 2.8. Configurazione della prova di aderenza (RILEM RC5)⁵⁴

2.3 Piano di manutenzione

2.3.1 Principi di base

L'articolo 38 del d.P.R. 207/2010 descrive i principi generali del piano di manutenzione, definito come “*il documento complementare al progetto esecutivo che prevede, pianifica e programma [...] l'attività di manutenzione dell'intervento al fine di mantenerne nel tempo la funzionalità, le caratteristiche di qualità, l'efficienza ed il valore economico*”⁵⁵.

A tal fine, i documenti operativi che costituiscono il suddetto piano sono tre:

1. Manuale d'uso;
 2. Manuale di manutenzione;
 3. Programma di manutenzione.
1. Il manuale d'uso riguarda l'uso delle parti dell'opera, in primis gli impianti. Il manuale descrive l'insieme di operazioni per la conservazione del bene (intervento delle parti in esame, rappresentazione grafica, descrizione) e presenta le indicazioni per il corretto uso.
 2. Il manuale di manutenzione regola la manutenzione delle parti dell'opera. Esso contiene le indicazioni per la corretta manutenzione, quali l'intervento delle parti in esame, la rappresentazione grafica, la descrizione dei mezzi richiesti per attuare l'intervento di manutenzione, le manutenzioni realizzabili dall'utente stesso e quelle invece da delegare a personale specializzato.

⁵⁴ E.P. Carvalho et al. / Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars, 2017

⁵⁵ d.P.R. 207/2010 – Regolamento di attuazione del codice dei contratti pubblici; art. 38: “Piano di manutenzione dell'opera e delle sue parti”

3. Il programma di manutenzione si attua con frequenza prestabilita ed è finalizzato ad una corretta gestione dell'opera negli anni. Esso consta di tre sottoprogrammi:
 - a. Il sottoprogramma delle prestazioni:
si riferisce alle prestazioni fornite dal bene nella sua vita.
 - b. Il sottoprogramma dei controlli:
riguarda il programma delle verifiche per valutare il livello prestazionale. In tale documento il progettista indica anche le frequenze temporali di controllo e di definizione dei livelli prestazionali.
 - c. Il sottoprogramma degli interventi di manutenzione:
indica i differenti interventi di manutenzione attuati in ordine cronologico.

Secondo il comma 4 dell'articolo 15 del sopracitato regolamento, i tre documenti operativi vanno redatti in fase di progettazione e devono essere disponibili alla consegna delle opere ultimate, in modo tale da avere le informazioni necessarie alla manutenzione e gestione dell'opera in ogni sua parte.

In sintesi, il piano di manutenzione deve collezionare tutte le informazioni e le predizioni concepite in fase di progetto, relative alla manutenzione e al ripristino degli stabiliti livelli prestazionali. Le informazioni fondamentali che quindi deve riportare sono quindi:

- Presentazione delle strategie di manutenzione;
- Definizione della probabilità di guasto;
- Presentazione dei criteri per la definizione della funzionalità.

In relazione a quest'ultimo punto, è necessario evidenziare che il progettista, all'atto della stesura del piano di manutenzione, ha l'incarico di determinare i metodi per il controllo delle prestazioni. Tale figura obbliga a definire livelli di prestazione e sistemi per la valutazione della prestazione in funzione di livelli di soglia, non imponendo metodi o sistemi ad hoc per il monitoraggio.

2.3.2 Strategie manutentive

Tenuto conto dei possibili comportamenti e degli usi dell'opera, il progettista che attua la strategia manutentiva può seguire due diverse impostazioni in materia, che consentono di concretizzare la manutenzione:

- a. Strategie curative
 - o A guasto avvenuto (riparazione, sostituzione):

una volta constatato il danno, si sceglie tra la riparazione e la sostituzione, considerando l'aspetto economico, funzionale e tecnologico.

- b. Strategie preventive
 - o Preventiva secondo soglia:

questa strategia viene utilizzata nel caso in cui si ricerca un elevato livello di affidabilità e viene attuata prima che si verifichi il guasto. L'intervento di manutenzione si svolge, infatti, automaticamente, dopo un prestabilito numero di cicli. La soglia limite di funzionamento associata viene determinata in modo statistico.

○ Preventiva secondo condizione:

l'intervento manutentivo ha inizio quando la riduzione prestazionale compromette lo stato di fatto del componente.

○ Preventiva secondo opportunità:

questa strategia rappresenta un compromesso tra le due precedenti ed è regolata dall'aspetto economico. Non viene fissato alcun limite di decadimento.

In aggiunta, la progettazione deve in ogni caso attenzionare la *manutenibilità* delle strutture. Essa può essere ricondotta ad alcuni requisiti fondamentali, come, oltre alla suddetta durabilità:

- Agevole ispezionabilità:
finalizzata a rendere più agili le operazioni di ispezione.
- Agevole smontabilità:
semplificazione dello smontaggio, consentendo le dovute riparazioni.
- Agevole sostituibilità:
agevolazione della sostituzione degli elementi.
- Economicità:
riduzione dei costi legati agli interventi di manutenzione.
- Facile riparabilità:
attitudine a subire interventi senza l'esigenza di operazioni complesse.
- Manutenibilità da parte di addetti:
agevolazione delle operazioni di ispezione da parte del personale addetto.

Capitolo 3

Monitoraggio strutturale

3.1 Generalità

Il rapporto tecnico UNI/TR 11634 definisce il monitoraggio strutturale come il “*rilevamento dello stato, ovvero del comportamento, di una struttura e della loro evoluzione nel tempo attraverso misure strumentali, acquisite mediante sensori, al fine di determinarne la condizione*”⁵⁶. In altre parole, questa attività rappresenta rilevazione periodica di parametri significativi del comportamento strutturale globale.

La tematica del monitoraggio strutturale sta assumendo sempre più importanza visto il patrimonio edilizio ed infrastrutturale italiano e il ruolo di prim'ordine che la gestione dell'opera da parte dell'operatore, privato o pubblico, sta acquistando. I recenti sviluppi normativi, concordemente, tendono ad impiegare le tecniche di monitoraggio per mezzo del suggerimento, che in molti casi si tramuta in obbligo, di dotare la struttura di un sistema di monitoraggio permanente. In aggiunta, oggi inizia a diffondersi la tendenza di integrare, per le più importanti opere ingegneristiche e già in progettazione, un sistema di monitoraggio per il controllo e la conoscenza. Il monitoraggio diventa così parte integrante del progetto strutturale e si riferisce sia alla realizzazione del manufatto che al suo esercizio. Il suo ruolo è indispensabile quando si ha a che fare con fenomeni complessi e imprevedibili.

Il monitoraggio della struttura (o Structural Health Monitoring - SHM) permette di ottenere la conoscenza del comportamento della costruzione alle azioni sollecitanti nel corso del tempo, persino in tempo reale, monitorando diversi parametri significativi in diversi punti del manufatto, nel tempo. Essa si effettua utilizzando reti di sensori collocati sulla struttura, sistemi per l'acquisizione dei dati, la loro memorizzazione e la loro analisi, unità di trasmissione dati e algoritmi software per il trattamento e l'analisi delle misure rilevate.

⁵⁶ Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 3: Termini, definizioni e abbreviazioni: §3.1.1: *monitoraggio strutturale*

Il grande interesse assunto dal monitoraggio degli edifici è soprattutto dovuto al fatto che questa tecnica è non invasiva e non distruttiva. Un altro elemento favorevole alla sua crescente diffusione è rappresentato dal supporto alla progettazione strutturale, associato alla calibrazione dei modelli agli elementi finiti (FEM) usati per le analisi sismiche e la progettazione degli interventi strutturali. Infatti, la grande potenzialità del monitoraggio (dinamico, in particolare) sta nella capacità di caratterizzazione sperimentale della struttura, senza arrecare alcun danneggiamento alla stessa: dalla risposta sperimentale è possibile dedurre le proprietà strutturali dinamiche (frequenze proprie, forme modali, smorzamenti, ecc.). Una volta ottenute per via sperimentale, queste caratteristiche possono essere confrontate con i parametri del modello numerico. In questo modo si attua la calibrazione del modello e si ricava una fedele rappresentazione della reale struttura; gli errori si riducono e la progettazione diventa più affidabile. Il suddetto processo viene complessivamente detto “identificazione dinamica”. Ulteriori aspetti che l’hanno resa una tecnica largamente impiegata nel settore ingegneristico sono l’aumento della potenza di calcolo e la diminuzione dei costi della strumentazione. I campi di applicazione sono svariati: oltre alla menzionata calibrazione dei modelli numerici, si evidenziano l’individuazione di anomalie e danneggiamento, l’osservazione del comportamento strutturale nel corso del tempo e della sua evoluzione a seguito di variazioni. Inoltre, l’attività di monitoraggio si rivolge in modo particolare alle strutture esistenti, siano esse in C.A., acciaio, legno o muratura.

Tra le varie tecniche di monitoraggio, per la sua pratica applicabilità si segnala l’OMA, analisi modale operativa: essa consente infatti la caratterizzazione strutturale semplicemente tramite la registrazione delle vibrazioni a cui è sottoposto il manufatto nel caso di input rappresentato dall’eccitazione ambientale (vento, traffico dei veicoli, ecc.).

3.1.1 Classificazione in base alla porzione di struttura coinvolta

Le tecniche di monitoraggio strutturale possono essere distinte in funzione di svariati aspetti: i principali, nonché quelli trattati nel presente elaborato, sono il periodo di osservazione del fenomeno o durata, l’estensione della struttura coinvolta nell’attività di monitoraggio e la frequenza temporale di osservazione del fenomeno.

Una prima fondamentale classificazione del monitoraggio strutturale può essere stabilita sulla base della porzione di struttura coinvolta nel monitoraggio. Al riguardo, si distinguono tecniche di monitoraggio locale e tecniche di monitoraggio globale.

- Monitoraggio locale:

l’osservazione è concentrata in specifiche parti della struttura e fenomeni che presentano natura locale: ad esempio, il monitoraggio delle fessurazioni o il monitoraggio di catene metalliche. Queste sue caratteristiche non lo rendono adatto per la valutazione delle condizioni di salute dell’intero edificio, ma resta pur sempre efficace in combinazione con il monitoraggio globale.

- Monitoraggio globale:

è così definito perché riguarda l'osservazione dell'intero organismo strutturale. L'applicazione tipica si riferisce allo screening dei parametri modali: su tutti, smorzamenti, forme modali e frequenze proprie specifiche della struttura indagata. Come menzionato nel paragrafo precedente, questi parametri consentono la taratura dei modelli FEM sulle indagini sperimentali, diventando quest'ultimi più affidabili, tramite correlazione con i risultati delle simulazioni numeriche. La correlazione tipica, la prima e la più immediata, riguarda il confronto tra le frequenze sperimentali e teoriche.

3.1.2 Classificazione in base alla frequenza di osservazione

In relazione alla frequenza temporale con cui un fenomeno è soggetto ad osservazione, è possibile parlare di monitoraggio statico e monitoraggio dinamico: questa costituisce difatti un'ulteriore, nonché la principale, classificazione. Le due tipologie presentano una impostazione completamente diversa e finalità totalmente differenti.

- Monitoraggio statico:

è così definito in quanto la frequenza di acquisizione è dell'ordine di 1 Hz, ossia una campione al secondo. In altri termini, il campionamento delle misure si verifica a intervalli regolari relativamente lunghi. Le frequenze di campionamento relativamente ridotte (anche un dato all'ora o una ogni tot di mesi) fanno sì che solo un numero limitato di dati venga acquisito, manualmente o automaticamente. Si presta all'osservazione di fenomeni meccanici quasi-statici, come inclinazioni, quadri fessurativi, deformazioni. Nel complesso, questa tipologia di raccolta dei dati è più affine a quelle specifiche dei controlli strutturali (Capitolo 2).

- Monitoraggio dinamico:

riguarda l'osservazione e la registrazione di un numero di dati molto più alto rispetto al monitoraggio statico, poiché prevede il campionamento delle rilevazioni in continuo. La frequenza è infatti di circa 1.000 Hz, equivalente ad un numero di mille campioni ogni secondo; questa "potenza" di acquisizione rende questo approccio di monitoraggio particolarmente adatto alla valutazione della risposta strutturale istantanea (spostamenti, velocità, accelerazioni). Se, in parallelo, si provvede al monitoraggio dell'input dall'ambiente esterno, ossia delle condizioni ambientali (temperatura, vento, sisma), è possibile correlare questo input all'output a livello strutturale (sollecitazioni, deformazioni).

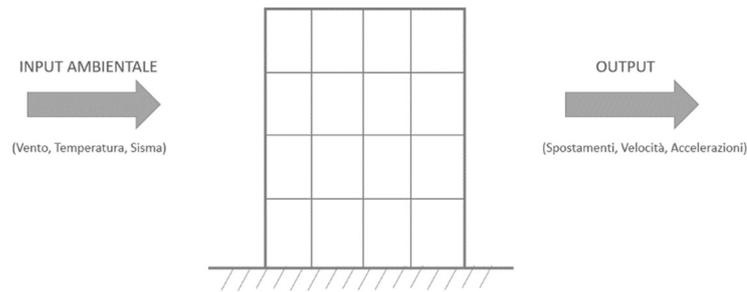


Figura 3.1. Schema relativo all'azione di filtro esercitata dalla struttura

L'esempio tipico è proprio legato al rilevamento della risposta dinamica della struttura ed è rappresentato dalla misura delle accelerazioni di un punto specifico dell'opera durante terremoto o vento di intensità rilevante.

3.1.3 Classificazione in base al periodo di osservazione

Le svariate tecniche di monitoraggio possono ulteriormente essere classificate, questa volta tenendo conto della durata dell'attività di monitoraggio, ossia del periodo di tempo in cui la struttura viene predisposta per l'osservazione del fenomeno. In tal caso si distinguono i monitoraggi a breve termine, in continuo, periodico o basato sulla definizione di valori soglia (anche detti trigger)⁵⁷.

- Monitoraggio a breve termine:

l'identificazione permette la conoscenza del comportamento dinamico della struttura in uno specifico istante temporale, finalizzata alla valutazione dello stato della struttura in un istante ben preciso. Questo tipo di test può essere condotto tramite acquisizione in giornata.

- Monitoraggio in continuo (o permanente):

questo tipo di indagine prevede che la struttura venga monitorata per un periodo molto lungo, ossia per mesi, anni o persino per l'intera vita utile del manufatto. La naturale applicazione che ne consegue riguarda l'analisi dell'evoluzione strutturale dinamica nel corso del tempo, mirata alla ricerca di eventuale danneggiamento o all'investigazione del deterioramento fisiologico del manufatto. Non di minor utilità risulta un'altra possibile applicazione, relativa alla definizione di rapide diagnosi strutturali post calamità, come terremoti.

- Monitoraggio periodico:

consiste nella ripetizione di vari monitoraggi a breve termine con una prefissata ciclicità temporale. Esso consente la verifica delle modifiche del comportamento dinamico; così, la sua principale applicazione è legata agli interventi di adeguamento sismico di una costruzione, in cui è possibile fare il confronto tra lo scenario ante operam e quello post operam.

- Triggered monitoring:

⁵⁷ A. Pierdicca, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" - §1.2: Il monitoraggio strutturale: classificazioni

si tratta di una particolare tecnica di monitoraggio dinamico che si attiva solo quando vengono superati valori soglia dei parametri monitorati imposti dalla normativa o dal progettista. A partire da tale circostanza hanno inizio le acquisizioni. L'acquisizione può essere inoltre associata all'entrata in funzione di allarmi o altri sistemi utili per la gestione dell'emergenza. Ciò comporta la memorizzazione dei soli dati di interesse tecnico.

3.1.4 Structural Health Monitoring (SHM)

Per quanto riguarda il ruolo del monitoraggio dinamico, questa tecnica rappresenta un supporto valido ai metodi di indagine classici e trova largo impiego in ambito di determinazione del livello di sicurezza delle costruzioni.

Al riguardo, si è soliti indicare i controlli e i monitoraggi relativi allo stato di salute strutturale o infrastrutturale con l'espressione *Structural Health Monitoring*, avente acronimo SHM. In esso rientra tutto un insieme di operazioni volte all'investigazione dei meccanismi di degrado strutturale: dalla rilevazione alla localizzazione, caratterizzazione e previsione tramite le opportune tecniche dello SHM. In sintesi, queste metodologie consentono di valutare e monitorare nel tempo lo stato di salute del manufatto; in esse, il monitoraggio dinamico interpreta il ruolo di protagonista.

Essenzialmente, la conoscenza del comportamento dinamico avviene a partire dalla rilevazione delle accelerazioni (dati), da cui valutare i parametri modali principali: frequenze proprie, forme modali e smorzamenti. Questi tre parametri costituiscono "l'impronta digitale" della struttura⁵⁸; se queste grandezze non variano, la risposta dinamica non subisce mutazioni. Essa non è influenzata dai carichi agenti, bensì dipende solo da tali caratteristiche intrinseche. Le fonti di variazione nel tempo dei suddetti parametri sono molteplici: danno strutturale, interventi di adeguamento o miglioramento sismico, invecchiamento dei materiali.

Un sistema di monitoraggio permanente per tutta la vita utile della struttura è in grado di trasformare il manufatto in una macchina intelligente tramite una rete sensoristica integrata alla struttura. L'associata valutazione della risposta strutturale in tempo reale consente di ottenere stime immediate dello stato di salute tramite una diagnosi approfondita, dal momento che si dispone delle accelerazioni a cui viene sottoposta la struttura. I conseguenti vantaggi sono: diagnosi immediata, gestione manutentiva efficace, aumento del livello di sicurezza, identificazione e misura oggettiva del danno.

Il sistema di monitoraggio entra in gioco nel processo decisionale relativo alla condizione di salute della costruzione. Infatti, una volta installati i sensori e calibrato il modello FEM, il confronto tra le accelerazioni acquisite e i valori soglia imposti consente l'eventuale diramazione di allarmi o l'attivazione di sistemi di allerta. Allo stesso modo, l'immediata diagnosi garantita dal sistema di monitoraggio, supportata dalla constatazione dello stato di salute sul

⁵⁸ A. Pierdicca, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" - §1.3: Structural Health Monitoring (SHM)

campo, permette di prendere decisioni sulla messa fuori servizio della struttura oppure la ripresa immediata dell'attività, con rilevanti conseguenze economiche. L'applicazione di questa procedura riguarda gli eventi calamitosi, come il sisma, ma anche il naturale declino di prestazioni della struttura nel tempo (invecchiamento). A tal fine è necessario rilevare e memorizzare lo stato zero della costruzione, ossia la condizione dell'opera al suo completamento, per poterne poi studiare l'evoluzione dinamica e confrontarlo con gli stati derivanti dalle successive caratterizzazioni dinamiche periodiche previste nel piano di monitoraggio.

3.2 Piano di monitoraggio

Il monitoraggio strutturale è da effettuarsi nei casi in cui si rende necessario seguire un determinato fenomeno fisico nel tempo, tra cui lo stato tensionale e/o deformativo, la temperatura, ed è del tutto indispensabile nel caso di fenomeni di dissesto in atto. Attualmente il monitoraggio è una peculiarità di una ristretta cerchia di edifici, in particolare strutture speciali come l'*Allianz Stadium* e il *grattacielo Intesa Sanpaolo*, a Torino, ambedue dotate di specifico piano di monitoraggio. Il numero di manufatti dotati di un sistema di monitoraggio è modesto e ben concentrato in opere che presentano importanza architettonica, ingegneristica o sociale, nonché le opere innovative, che richiedono un controllo delle condizioni di sicurezza più accurato. Tuttavia, spinta dalle novità a livello normativo, questa attività sta prendendo piede anche per le opere più comuni, edifici civili in primis.

Per quanto riguarda la fase in cui si presenta la necessità di predisporre un piano di monitoraggio, a differenza del piano dei controlli, che viene redatto generalmente prima del progetto dato che le misure vengono ripetute più volte, il piano di monitoraggio può svolgersi in fasi differenti dell'attività di progetto. Può trattarsi di un momento intermedio della progettazione oppure della fine del processo progettuale. Nel primo caso l'utilità è rappresentata dal confronto dello stato tensionale derivato sperimentalmente con quello determinato tramite modello di calcolo; nel secondo caso, invece, si mira ad ottenere una conferma sperimentale della idoneità degli interventi e a monitorare lo stato di salute del manufatto nel corso del tempo.

Gli step secondo cui si articola la definizione di un piano di monitoraggio sono i seguenti⁵⁹:

1. *Definizione dei parametri da monitorare:*

questa fase può essere ripetuta più volte durante l'attività di monitoraggio. Sono svariati i parametri strutturali di cui si richiede la conoscenza, tra cui spostamenti, deformazioni, stato tensionale. In aggiunta, può rivelarsi necessario valutare le azioni ambientali a cui è sottoposta la struttura (vento, temperatura, umidità, ecc.), associate ai cosiddetti parametri ambientali.

2. *Individuazione delle tecniche di monitoraggio adatte allo scopo:*

⁵⁹ Articolo di Ingenio: "Il monitoraggio strutturale e la definizione del piano di monitoraggio", Ing. Vincenzo Giannetto, Ing. Marika Volpe – Indagini strutturali srl (<https://www.ingenio-web.it/26655-il-monitoraggio-strutturale-e-la-definizione-del-piano-di-monitoraggio>)

la caratterizzazione delle varie tecniche deve tener conto di diversi aspetti, tra cui le limitazioni della tecnica, i costi, la pratica operativa, l'invasività, la potenzialità e la velocità di acquisizione. Si distinguono due tecniche di monitoraggio, in base alla modalità di rilevazione dei dati:

- 2.1 Tecniche di monitoraggio semplici, per la misura diretta del parametro osservato a intervalli di tempo prestabiliti e costanti;
- 2.2 Tecniche di monitoraggio complesse, le quali, possedendo un trigger, garantiscono la variazione dell'intervallo temporale di acquisizione a seguito di superamento del valore soglia di alcuni parametri.

3. *Scelta delle tecniche di indagine:*

in funzione dei punti precedenti, il progettista definisce il piano di monitoraggio, indicando le caratteristiche delle misure (tipologia, numero, collocazione, fasi temporali) e la frequenza di rilevazione dei dati.

Infine, si sottolinea la necessità di collaborazione tra progettista e società che ha l'incarico del monitoraggio, la quale, in funzione degli obiettivi, può fornire informazioni tecnologiche e informatiche utili per la scelta metodologica e per la stesura del piano in esame.

Dalle suddette valutazioni e considerando che gli obiettivi dell'attività possono variare nel tempo, si deduce che la definizione di un piano di monitoraggio non è meno articolata di quella relativa al piano di manutenzione o dei controlli. Il confine tra il piano di monitoraggio e il piano delle indagini strutturali non è evidente e le due attività sono di fatto equiparabili. Ciò viene testimoniato dai casi in cui non è presente un sistema per il monitoraggio ma tale mancanza viene sopperita da un fitto piano dei controlli che prevede verifiche per tenere sotto osservazione lo stato di conservazione di elementi e materiali. Un esempio notevole al riguardo è lo *Stadio Olimpico Grande Torino*⁶⁰, attualmente non dotato di sistema di monitoraggio ma per il quale sono previste stringenti verifiche dello stato conservativo e della condizione di lavoro dei nodi e degli elementi significativi per il comportamento globale.

3.3 La catena di misura

La presente sezione è dedicata alla generica architettura di un sistema di monitoraggio, con particolare interesse nei confronti dei componenti fondamentali che la caratterizzano e del loro principio di funzionamento.

Il monitoraggio non costituisce un'attività semplice e lineare, bensì una pratica multidisciplinare basata su svariate tecniche che esulano dal contesto dell'ingegneria civile in senso stretto, tra cui l'analisi dei dati e la teoria dei segnali.

⁶⁰ Manzone F., "Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici" - §7: Esempi applicativi; §7.4: Stadio Olimpico Grande Torino

Il primo passo nel processo del monitoraggio è rappresentato dalla giusta scelta della strumentazione. Il complesso di strumenti e apparecchiature deve essere selezionato con grande attenzione dato che la buona riuscita di una identificazione dinamica di una struttura dipende dall'operazione di misura, da svolgersi in modo rigoroso.

La misura di una grandezza implica il ricorso ad una *catena di misura*, ossia un sistema costituito da una successione di strumenti collegati al fine di elaborare il segnale di misura, dal misurando in uscita dal sensore alla misura vera e propria. Le componenti basilari della catena di misurazione per l'analisi modale sono le seguenti, concettualmente schematizzate nella figura sottostante⁶¹:

- *Sensoristica*
Insieme dei sensori, ossia degli strumenti di misura che forniscono informazioni utili al monitoraggio, rappresentate dalle rilevazioni.
- *Centralina di acquisizione*
Dispositivo addetto all'acquisizione dei segnali e alla loro trasformazione da analogici a digitali.
- *Software di acquisizione*
Software a cui compete l'acquisizione dei segnali e il trattamento dei dati (elaborazione in frequenza, filtraggio e così via).
- *Software di identificazione dinamica*
Componente logico contenente gli algoritmi matematici di identificazione, grazie ai quali si estraggono i parametri modali.

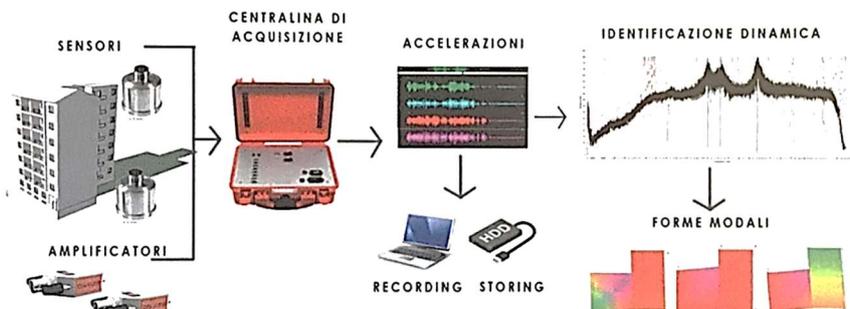


Figura 3.2. Rappresentazione schematica della catena di misura

Le linee guida UNI per il monitoraggio strutturale, il rapporto tecnico UNI/TR 11634⁶², costituiscono un riferimento essenziale per la trattazione della catena di misurazione e per la comprensione di come essa debba essere progettata per lo specifico caso in esame.

3.3.1 La progettazione del sistema di monitoraggio

La normativa UNI dedica ampio spazio all'ideazione del sistema di monitoraggio, trattando sia la progettazione di massima, al capitolo 5, sia il progetto esecutivo, al capitolo 6. In base

⁶¹ A. Pierdicca, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" - §3: La catena di misura

⁶² Norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" 2016

al fenomeno da monitorare si definiscono i criteri per una corretta progettazione del sistema di monitoraggio.

La *progettazione di massima* del sistema di monitoraggio ha l'obiettivo di fissare in modo preciso le indicazioni per la stesura del progetto esecutivo, definendo la strategia di monitoraggio. La sequenza delle attività che devono essere svolte in sede di progettazione di massima è la seguente⁶³:



Figura 3.3. Schema del processo di progettazione del sistema di monitoraggio strutturale

I Definizione degli obiettivi generali del sistema

In genere gli obiettivi del sistema non sono fissati in modo chiaro all'atto di attivazione del monitoraggio, in cui si dispone di obiettivi generici:

- Conoscenza dello stato di salute della struttura;
- Ricerca di eventuali meccanismi di degrado in atto.

Gli obiettivi vengono descritti tramite indici e classificazioni, come un indice di danno, un indice di vita residua, una classificazione del livello prestazionale.

II Analisi della struttura e definizione degli obiettivi specifici

Per contenere la complessità del sistema e garantire la conoscenza della struttura si deve identificare un numero ridotto ma adeguato di grandezze significative da monitorare. Queste grandezze individuate difatti come obiettivi specifici del sistema derivano da analisi preliminare basata su tipologia e organizzazione strutturale e possono essere:

- Variabili di stato: caratteristica della risposta strutturale (come lo spostamento di interpiano) oppure caratteristica delle azioni;
- Parametri del sistema;
- Grandezze, come i parametri modali, che qualificano il comportamento della struttura.

⁶³ Norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" 2016 – Capitolo 5: Progettazione di massima del sistema di monitoraggio; Punto 5.1: Generalità

I parametri di controllo selezionati costituiscono l'input dei modelli interpretativi e l'inizio della definizione più tecnica del sistema: dalla scelta dei sensori e delle modalità di acquisizione dei dati ai sistemi di trattamento degli stessi.

III Strategia di misura e definizione della rete di sensori

Il tipo di grandezza misurata, il numero e la posizione dei sensori sono da definirsi in un layout dettagliato.

Per quanto riguarda il tipo di grandezza, sono da preferirsi grandezze correlate in modo diretto ai parametri di comportamento, limitando incertezze di interpretazione.

Per ciò che concerne la configurazione strumentale, il numero e la posizione dei punti di misura devono essere definiti in modo da garantire tutte le informazioni di cui il modello interpretativo necessita.

IV Definizione dei sistemi di acquisizione

Dalla configurazione strumentale si fissano i requisiti prestazionali del sistema di acquisizione: numero di ingressi (canali), alimentazione, dimensione dei database, sensori collegabili, frequenza di campionamento, tipologia di acquisizione (programmata, continua, automatica su trigger), dislocazione fisica del sistema (sistema centralizzato o distribuito). In aggiunta, si identificano le modalità di acquisizione di ogni tipo di sensore:

1/3 Frequenza di campionamento:

tale da consentire la ricostruzione del segnale originario a partire dai suoi campioni. Secondo il *Teorema del campionamento* o *Teorema di Nyquist-Shannon*⁶⁴, la frequenza di campionamento deve essere almeno pari alla metà della frequenza massima del segnale. Se così non fosse, si rischia di andare incontro all'*Aliasing*⁶⁵: la generazione di un falso segnale, causato dal sotto campionamento.

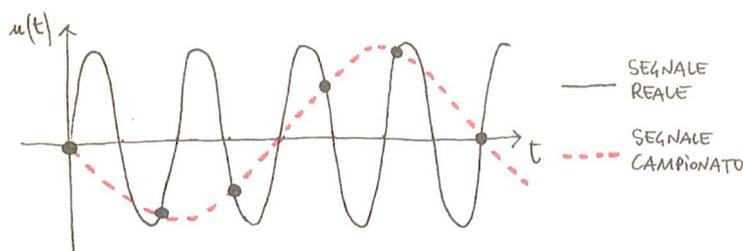


Figura 3.4. Fenomeno dell'Aliasing: segnale reale e segnale campionato "equivocato"

La frequenza massima di campionamento è vincolata dalle limitazioni dei sistemi di trasmissione e archiviazione dati.

2/3 Periodicità di acquisizione:

⁶⁴ A. Pierdicca, F. Mattiauda, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" 2021 – Capitolo 2: Cenni alla teoria dei segnali; §2.8.1: Il teorema di Nyquist-Shannon

⁶⁵ A. Pierdicca, F. Mattiauda, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" 2021 – Capitolo 2: Cenni alla teoria dei segnali; §2.8.2: Il fenomeno dell'aliasing

dipende dal tipo di acquisizione, distinguendo in particolare l'acquisizione periodica da quella su evento.

3/3 Requisiti di sincronizzazione dei dati.

V Definizione delle modalità di trattamento dei dati

I dati grezzi necessitano di una elaborazione per ottenere informazioni valide per i modelli interpretativi. Il trattamento consta di tre fasi:

- Pre-processing (descritto in seguito);
- Valutazione delle grandezze significative obiettivo del sistema (dalla grandezza misurata);
- Aggiornamento dei modelli interpretativi.

VI Selezione dei modelli interpretativi

Modelli fisico-matematici o modelli d'analisi del segnale che a partire dai risultati sperimentali consentono l'identificazione dello stato della struttura e la ricerca di un danno, tramite la minimizzazione di una funzione errore derivante dai dati stessi.

VII Definizione delle procedure decisionali

Le soglie di attenzione in genere sono organizzate su due livelli, corrispondenti al passaggio tra i seguenti stadi:

- Verde: comportamento ottimale;
- Giallo: è richiesta attenzione;
- Rosso: è richiesto un intervento.

VIII Controllo dei requisiti di accuratezza del sistema

È possibile ricorrere a valutazioni empiriche, tra cui la probabilità di errata classificazione (%), ossia “*la frequenza relativa [...] con cui il sistema identifica uno stato sbagliato*”⁶⁶.

In sintesi, un'opportuna progettazione del monitoraggio di una struttura passa per i seguenti punti:

- Analisi del comportamento strutturale;
- Selezione dei parametri di controllo, in base agli obiettivi;
- Selezione dei sensori e delle modalità di acquisizione;
- Definizione dell'architettura del sistema (per la quale si rimanda al paragrafo seguente).

3.3.2 Hardware e Software

L'architettura del sistema, le componenti hardware e software vengono definite nel progetto esecutivo⁶⁷, redatto dopo quello di massima.

⁶⁶ Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 5: Progettazione di massima del sistema di monitoraggio; Punto 5.9.1: Espressione dell'accuratezza richiesta

⁶⁷ Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 6: Progetto esecutivo del sistema di monitoraggio

L'architettura del sistema, intesa come la struttura secondo cui le diverse componenti della catena di misura del sistema di monitoraggio sono collegate, dipende dalle sue singolarità e dalle caratteristiche dell'apposito manufatto monitorato. In linea di massima, la configurazione tipo prevede:



Figura 3.5. Configurazione classica della catena di misura

In base a come queste componenti sono distribuite, e quindi alla configurazione logica della rete, si può avere:

- Un sistema centralizzato;
- Una rete di sensori digitali;
- Un sistema misto.

Nel primo, un unico dispositivo è addetto alla conversione analogico-digitale e tutti i sensori sono collegati ad esso; nel secondo, invece, l'integrazione di sensore e convertitore in un dispositivo unico, il sensore digitale, garantisce la conversione in corrispondenza di ogni sensore.

Si parla, poi, di sistemi cablati (o wired) se la comunicazione dei segnali digitali avviene tramite cavo e di sistemi wireless se la trasmissione avviene via radio-frequenza.

Hardware

I principali componenti hardware del sistema di monitoraggio sono:

- Sensori: sono scelti in funzione della grandezza misurata, delle caratteristiche fisiche e delle condizioni ambientali, dell'incertezza di misura, dell'intervallo di misura previsto;
- Dispositivi di acquisizione: la scelta è basata sul numero di sensori collegati, sui segnali in uscita dai sensori (ad es. corrente) e sulla loro frequenza di campionamento, sul tipo di monitoraggio (permanente o occasionale) e sull'incertezza;
- Dispositivi di comunicazione digitale: la scelta è basata sul modo (wired o wireless) e sul protocollo di comunicazione;
- Equipaggiamento ed accessori: si tratta di cavi, alimentatori per il funzionamento dei sensori, connessioni e di tutti i componenti accessori che sono necessari per la trasmissione dei segnali e che influenzano la qualità e l'incertezza del sistema.

Software

I componenti software del sistema sono applicazioni per l'acquisizione e l'archiviazione delle misure in segnale digitale e, nei casi avanzati, la gestione del sistema e l'elaborazione dati. Di conseguenza, si distinguono:

- Software di acquisizione: sviluppato tramite un linguaggio di programmazione compatibile alle unità di acquisizione, consente l'introduzione dei parametri di controllo (frequenza di campionamento, canali disponibili, taratura dei sensori);
- Software di archiviazione: la memorizzazione dei dati può avvenire su file o database, locale o remoto, e il formato del salvataggio deve essere scelto in modo da ridurre l'impiego di memoria su disco;
- Software di gestione: consente l'identificazione, la variazione, il trattamento e la rappresentazione dei dati.
- Software di analisi: ha lo scopo di determinare lo stato di salute e il comportamento del manufatto sotto investigazione, tramite l'elaborazione dei dati del monitoraggio sulla base di algoritmi di interpretazione dati.

3.3.3 Centralina di acquisizione

Un paragrafo a parte è dedicato alla centralina di acquisizione, lo strumento principale per realizzare un monitoraggio dinamico. In sostanza si tratta di un convertitore analogico-digitale, anche detto Analog-to-Digital Converter (ADC), il quale è in grado di convertire il segnale analogico reale derivante dai sensori in un segnale digitale, in grado di essere elaborato da computer. Il segnale digitale è infatti costituito da una sequenza di numeri associati all'ampiezza del segnale.

La conversione si esegue tramite due operazioni fondamentali: discretizzazione e quantizzazione. La discretizzazione del segnale rappresenta il suo campionamento, con riferimento all'asse del tempo. La quantizzazione consiste nel discretizzare il segnale rispetto all'asse delle ampiezze, a pari istante di campionamento.

3.3.4 Sensori: gli accelerometri

Sensori per il monitoraggio

Un'altra componente fondamentale della catena di misura è rappresentata dai sensori.

Si definiscono sensori o trasduttori *“i dispositivi che consentono di convertire la quantità in una quantità elettrica (tipicamente una differenza di tensione). Una volta che il segnale elettrico viene convertito in voltaggio viene trasferito alla centralina di acquisizione per le operazioni di digitalizzazione”*⁶⁸.

⁶⁸ A. Pierdicca, F. Mattiauda, *“Il monitoraggio dinamico delle strutture”* 2021 – §3.3: Sensoristica: gli accelerometri

Si procede all'analisi delle categorie di sensori che trovano ampio impiego nell'ambito del monitoraggio delle strutture, distinti sulla base del fenomeno osservato, tenendo conto del principio di funzionamento e del meccanismo di misura.

- Misura delle deformazioni:

Lo strumento principale è l'estensimetro, il quale misura la deformazione lungo una direzione; per cui, la deformazione globale viene ricavata usando una combinazione di più unità. I più diffusi estensimetri risultano:

1. Estensimetri elettrici a resistenza:

è costituito da un filo elettrico su una piastrina di supporto. La deformazione comporta la variazione di lunghezza del filo, associata alla modifica della sua resistenza elettrica, da cui derivare la deformazione stessa.

2. Estensimetri acustici:

la deformazione comporta una variazione di lunghezza e, quindi, di frequenza di vibrazione, secondo il principio del "filo teso".

- Misura delle accelerazioni:

avviene tramite gli accelerometri, i quali si servono di una massa e sfruttano la relazione fisica che sussiste tra le due grandezze.

Considerato il ruolo centrale occupato in ambito di monitoraggio strutturale, in particolare dinamico, l'intero paragrafo successivo viene dedicato a questi sensori.

- Misura delle velocità:

tramite accelerometri LVDT, per mezzo dell'integrazione dell'accelerazione nel tempo ma anche tramite strumenti per la misura diretta basati su un magnete permanente in moto rispetto ad un avvolgimento.

- Misura degli spostamenti:

I trasduttori di spostamento principali sono i capacitivi (descrizione analoga alla precedente), potenziometrici e LVDT. I trasduttori potenziometrici sono basati sullo spostamento di un'asta rispetto al corpo dello strumento, legato ad una variazione di tensione. I sensori induttivi o LVDT, invece, si basano sulla variazione di induttanza. Infine, si citano i fessurimetri o vetrini, ossia quelle piastrine applicate a cavallo di una fessura per il monitoraggio del quadro fessurativo.

- Misura dei cedimenti:

tramite rilievo topografico di alcuni punti della struttura. Si definiscono dei capisaldi che costituiscono la base per la creazione di una rete topografica. Il metodo del monitoraggio topografico consiste nel controllo periodico di questa rete fatta di capisaldi e mire da traguardare.

- Misura delle forze:

tramite le celle di carico, costituite da un elemento di modulo elastico, dimensioni e materiale noto a cui si applica un estensimetro. Dalla deformazione si può ricavare il carico.

- Misura delle inclinazioni:

dalla misura del dislivello di un liquido inserito in due vasi comunicanti, sfruttando il principio del livello idrostatico; si applica soprattutto al monitoraggio dei ponti.

- Misura della temperatura:

avviene tramite termometri (basati sulla dilatazione termica di una sostanza) o rilevatori (basati sull'influenza della temperatura sulla resistenza elettrica di alcuni materiali). Dilatazioni e contrazioni sono un problema se incompatibili con i vincoli, causando sollecitazioni aggiuntive.

Accelerometri

I sensori più impiegati nel monitoraggio strutturale per l'identificazione della risposta dinamica sono gli accelerometri.

Per quanto riguarda il principio di funzionamento, un elemento elastico mette in sospensione la massa, mentre dall'altra parte un sensore valuta il suo spostamento rispetto alla struttura fissa dello strumento. Il sensore è in grado di convertire lo spostamento, proporzionale all'accelerazione della massa, in segnale elettrico.

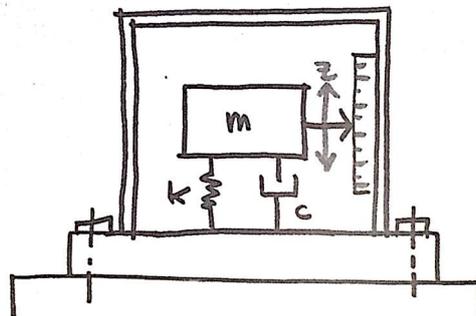


Figura 3.6. Schema concettuale dell'accelerometro: sistema massa-molla-smorzatore

Gli accelerometri possono essere distinti in base al modo in cui viene prodotto il segnale elettrico proporzionale all'accelerazione:

1. Accelerometri per misure di accelerazione statica
per accelerazioni statiche, continue (0 Hz), come l'accelerazione di gravità.
2. Accelerometri per misure di accelerazione dinamica
per accelerazioni variabili nel tempo (es. da urti o vibrazioni).

I principali sono gli accelerometri estensimetrici, piezoresistivi, LVDT, capacitivi e piezoelettrici. Gli ultimi tre sono i più diffusi:

- o Accelerometri LVDT:

basati sulla determinazione della posizione relativa di una massa interna al sensore rispetto al corpo dello strumento tramite valutazione della differenza di potenziale in un avvolgimento elettrico.

○ Accelerometri capacitivi:

basati sulla misura della distanza tra le facce fissa e mobile di un condensatore piano, la cui variazione per effetto dell'accelerazione comporta la modifica del campo elettrico del condensatore.

○ Accelerometri piezoelettrici:

basati su un cristallo piezoelettrico e le sue proprietà, le quali garantiscono la produzione di un segnale elettrico proporzionale alla forza agente. In questo modo, la compressione del cristallo causata dalla massa in accelerazione produce un segnale elettrico proporzionale alla compressione stessa. I sensori piezoelettrici sono i più usati nell'ambito dell'analisi modale. Questi possono essere con uscita in carica o in tensione: nel secondo caso il circuito di condizionamento è integrato all'accelerometro e si parla di IEPE o di ICP. Tali sensori, inoltre, possono essere monoassiali, biassiali o triassiali, in base al numero di cristalli piezoelettrici contenuti (1, 2 o 3) e, di conseguenza, gli assi di vibrazione rilevabili.

La prestazione del sensore è definita dalle *caratteristiche funzionali* statiche e dinamiche⁶⁹ da cui dipende la scelta del sensore in base all'applicazione. Esse possono essere impostate a mano oppure in automatico, come avviene con la tecnologia TEDS in cui un microchip nel sensore ha le informazioni della carta di calibrazione e comunica con la centralina. Tali parametri principali risultano:

1. Range di misura:

intervallo simmetrico delle accelerazioni che possono essere misurate dal sensore per cui è garantito un segnale in uscita lineare (ad es. $\pm 2g$):

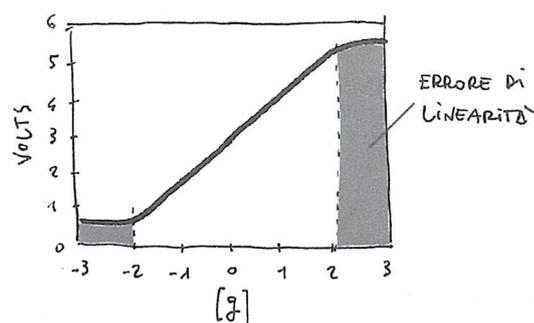


Figura 3.7. Range di misura circoscritto dall'errore di linearità

2. Non-linearità:

deviazione dalla linearità del parametro ideale, espressa in percentuale del fondo scala.

3. Sensibilità o sensitività:

⁶⁹ A. Pierdicca, F. Mattiauda, "Il monitoraggio dinamico delle strutture" 2021 – §3.3.1: Accelerometri: caratteristiche principali

minima quantità rilevabile, rapporto tra la differenza di segnale in uscita e la corrispondente variazione di accelerazione in ingresso, in V/g o mV/g:

$$\text{sensibilità} = \frac{\Delta V_{\text{out}}}{\Delta g} \quad (3.1)$$

4. Risposta in frequenza:

range in frequenza di impiego del sensore, anche detta “banda passante”.

I fattori da cui dipende sono due: la massa sismica e la rigidità dell’elemento elastico: a pari rigidità, la risposta in frequenza aumenta al diminuire della massa sismica; tale aumento è abbinato ad una minore sensibilità.

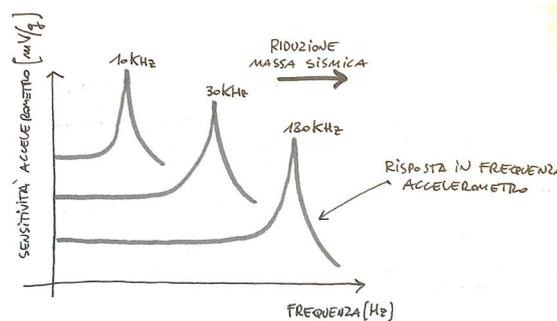


Figura 3.8. Risposta in frequenza dell'accelerometro al variare della sua massa sismica
Nota: da qui si evidenzia che il frequency range è legato alla frequenza di risonanza

5. Offset in uscita a 0 g:

tensione in uscita nel caso di accelerazione applicata nulla (0 g), in V o mV.

6. Tensione di alimentazione:

gamma di tensioni di alimentazione possibili del sensore.

7. Errore di allineamento del package:

angolo tra il piano del *package* e il *die*. Il primo è il riferimento degli assi esterni mentre il secondo costituisce il riferimento degli assi interni.

8. Sensibilità asse-asse:

entità del segnale mostrato sulle uscite corrispondenti agli assi ortogonali all’asse a cui è applicata l’accelerazione, a causa degli errori di allineamento tra assi.

9. Rumore:

rumore elettrico prodotto dal circuito di amplificazione, il quale diminuisce al crescere della frequenza. In genere di livelli di rumore, espressi in g.

Accelerometri MEMS

I passi da gigante registrati negli ultimi tempi in campo elettronico hanno consentito di rispondere all’esigenza di combinazione di una miniaturizzazione molto spinta con l’alto grado di complessità dell’informazione coinvolta. La risposta scientifica arriva dalle tecnologie più innovative, messe in campo negli ultimi anni e rappresentate da microsistemi basati sull’integrazione di elementi meccanici e circuiti elettronici per il condizionamento del segnale in un unico componente. Questo passo in avanti si deve all’evoluzione delle tecniche di lavorazione del silicio.

Gli accelerometri capacitivi si prestano bene a tali soluzioni di tipo *embeded*, in cui accelerometro e relativo sistema di controllo e elaborazione del segnale vengono integrati in un unico chip di silicio: si ottiene un dispositivo di tipo MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems). Sono apparecchi di dimensioni dell'ordine dei micron costruiti su un substrato di silicio e introdotti in forma di sistemi analogici per il trattamento di segnali. Se da una parte la miniaturizzazione elettronica dei sistemi analogici comporta un'importante riduzione del rapporto segnale/rumore e il processo produttivo di assemblaggio dei componenti può compromettere il sensore MEMS, dall'altra parte consente l'integrazione di vari componenti in un unico pacchetto, rendendo il dispositivo una micro macchina completa e intelligente.

Infine, è doveroso evidenziare che ad oggi l'applicabilità dei sensori MEMS per l'identificazione dinamica di strutture civili costituisce una inventiva ideale, a causa del rapporto segnale/rumore ancora non compatibile con le sensibilità molto elevate richieste, tipiche dei sensori piezoelettrici. Eppure, le innovazioni tecnologiche raggiunte e l'evoluzione dell'elettronica fanno ben sperare in ottica futura.

3.4 Identificazione dinamica delle strutture

L'identificazione sperimentale dei parametri modali è una direzione di ricerca attiva e questa parte della trattazione vuole evidenziarne gli aspetti scientifici e teorici su cui essa si fonda. L'analisi della teoria su cui si basa il monitoraggio viene svolta in termini di tecniche analitiche impiegabili, procedura matematica alla base degli algoritmi di identificazione dinamica e fasi principali di un monitoraggio dinamico.

L'identificazione dinamica rappresenta la metodologia tramite la quale si riesce a costruire un modello numerico che sia in grado di rappresentare in modo corretto le reali caratteristiche dinamiche di una struttura.

Le tecniche di identificazione strutturale appartengono alla classe dei metodi indiretti o inversi, ossia in cui si vogliono determinare le proprietà meccaniche del sistema a partire dalla conoscenza della risposta strutturale e, non sempre, dei carichi.

Le tecniche tradizionali di identificazione sono basate sulla misurazione sia dell'input (eccitazione) che dell'output (risposta) per la stima dei parametri modali. Al riguardo si segnalano anche applicazioni particolari in ambito di acquisizione dinamica, come l'utilizzo della vibrodina lineare al fine di eseguire lo sweep in frequenza.

Tuttavia, le tecniche avanzate hanno il grande vantaggio di non dover applicare alcuna eccitazione alla struttura, e quindi di non dover misurare alcun segnale di forza. In tal senso si decide di soffermarsi sull'OMA, la quale verrà approfondita per le sue potenzialità e per le caratteristiche che la rendono interessante, su tutte l'eccitazione di tipo ambientale naturale.

Tra tutti i metodi, la Stochastic Subspace Identification è una delle tecniche più robuste e accurate per l'analisi modale operativa e per questo sarà oggetto di analisi dettagliata.

3.4.1 Introduzione

L'identificazione dinamica si configura nell'ingegneria strutturale come una tecnica di indagine non distruttiva, capace di estrapolare le caratteristiche strutturali che definiscono la carta d'identità del manufatto e del suo comportamento dinamico, a partire dai suoi parametri modali.

Le tecniche di identificazione sono utilizzate per strutture nei confronti delle quali i carichi dinamici (tra cui gli effetti ambientali) possono comportare azioni significative per la risposta strutturale, comprese modifiche a livello di comportamento. Il monitoraggio dinamico è finalizzato esattamente alla conoscenza di tali modifiche, rivestendo un ruolo basilare nell'esecuzione di diagnosi e nel controllo dello stato di salute del manufatto; al cospetto di un danneggiamento, infatti, si verifica una variazione di frequenze proprie e modi di vibrare.

La parte determinante per l'identificazione intelligente del danno è la selezione dell'algoritmo di elaborazione dei dati dell'identificazione dinamica.

3.4.2 Presupposti e contesto di base dell'analisi modale

Tutte le strutture presentano un comportamento modale, dipendente da come masse e rigidità sono distribuite. Il presupposto dell'analisi modale si identifica nella scomposizione della risposta vibrazionale per mezzo di una combinazione lineare di sistemi ad un grado di libertà.

La rappresentazione della risposta strutturale può avvenire in diversi domini. Per chiarire questo concetto, si consideri l'archetipo rappresentato da un edificio di 3 piani, schematizzabile con un sistema a 3 gradi di libertà. Ciascuna colonna dello schema è associata ad uno specifico dominio di rappresentazione della risposta di tale sistema meccanico.

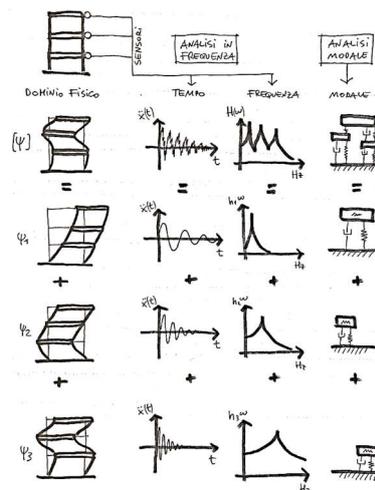


Figura 3.9. Implementazione di un sistema meccanico nei diversi domini di rappresentazione

- Dominio fisico:

la deformazione geometrica totale della struttura può essere scomposta in una serie di deformazioni più elementari, le forme modali (modelli di moto di tutti i punti della struttura ad una data frequenza modale);

- Dominio del tempo:

la risposta strutturale può essere visualizzata per mezzo di un segnale nel tempo, esprimibile tramite una serie di sinusoidi che si smorzano nel tempo;

- Dominio della frequenza:

dall'analisi del segnale nel tempo è possibile ottenere uno spettro con diversi picchi, decomponibile in un insieme di spettri di risposta a singolo grado di libertà;

- Dominio modale:

si fa riferimento ad un modello modale per visualizzare la risposta della struttura, composto da modelli a singolo grado di libertà. Ad ogni modello a singolo grado di libertà si associano i parametri modali.

L'analisi modale si configura proprio come il processo di determinazione di tali parametri, per tutti i modi della struttura appartenenti al range di frequenze di interesse. Questi parametri consentiranno la costruzione di un modello modale della risposta della struttura, il cui comportamento dinamico verrà a rappresentarsi come somma delle sue forme modali.

3.4.3 Cenni alla teoria della dinamica delle strutture

3.4.3.1 Il SDOF e l'equazione dinamica del moto

Il sistema strutturale più elementare viene chiamato "oscillatore semplice". Esso è costituito da una massa m capace di moto in una sola direzione (grado di libertà), una molla elastica di rigidità o costante elastica k (N/m) e uno smorzatore viscoso con coefficiente di smorzamento c . Tale struttura è quindi un sistema ad uno solo grado di libertà (Single Degree Of Freedom – SDOF).

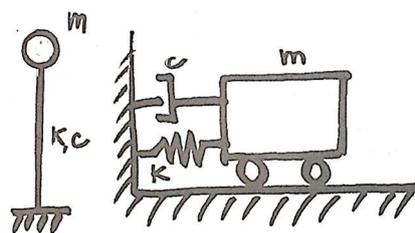


Figura 3.10. Oscillatore semplice

Per ricavare l'equazione del moto di tale sistema è necessario imporre l'equilibrio delle forze in gioco, una volta applicata una forzante esterna $Q(t)$ al sistema. Definite le forze in gioco:

- Forze di inerzia: $F_I = m \cdot \ddot{u}(t)$, con $\ddot{u}(t)$: accelerazione;
- Forze dello smorzatore: $F_d = c \cdot \dot{u}(t)$, con $\dot{u}(t)$: velocità
- Forze di richiamo elastico: $F_s = k \cdot u(t)$, con $u(t)$: spostamento;

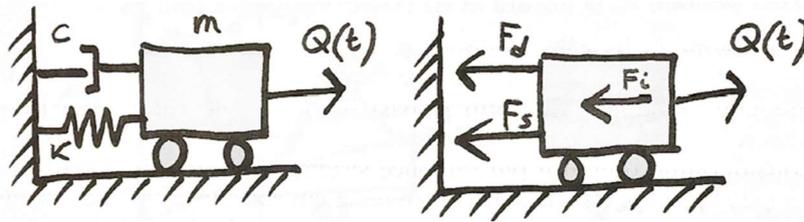


Figura 3.11. SDOF soggetto a forzante esterna: forze agenti

è possibile ottenere l'equazione del moto nella seguente forma:

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = Q(t) \quad (3.2)$$

Questa equazione può essere specializzata in base alla situazione considerata in termini di forzante e smorzamento, distinguendo oscillazioni libere o forzate, smorzate o non.

Ci si concentri sulle oscillazioni forzate, pensando di applicare al sistema una forzante dinamica $Q(t)$, di tipo sinusoidale con pulsazione ω_f .

Quando ω_f è prossima alla pulsazione naturale (ω_0) si verifica il fenomeno della risonanza strutturale: la risposta viene amplificata in modo indefinito con conseguente possibile collasso anche per azioni di lieve entità. Questo è propriamente vero in condizioni idealmente non smorzate, in quanto in caso di strutture smorzate la risposta cresce ma si va a stabilizzare in due asintoti orizzontali in base al rapporto di smorzamento, ξ . Questo fenomeno viene sfruttato per l'identificazione dei parametri modali.

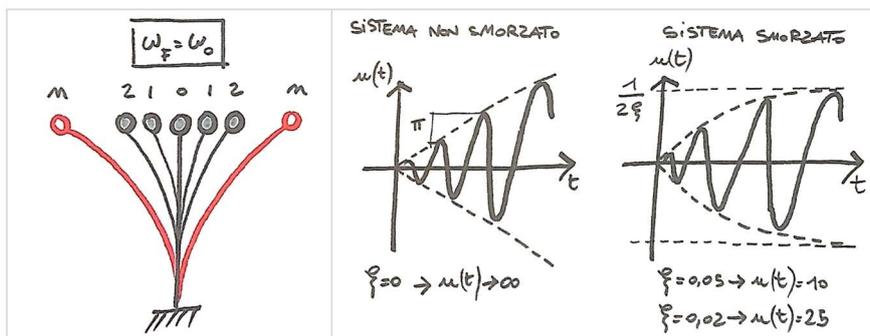


Figura 3.12. Risonanza strutturale: amplificazione della risposta in funzione dello smorzamento

3.4.3.2 MDOF: l'oscillatore multiplo

Il concetto dell'oscillatore semplice può essere parimenti esteso a sistemi più complessi, dotati di più masse e rigidità, ottenendo un sistema a più gradi di libertà (Multiple Degree of Freedom – MDOF). Questo cambio di dimensione si traduce nel passaggio alla notazione matriciale; l'equazione del moto diventa:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} + [C] \cdot \{\dot{u}(t)\} + [K] \cdot \{u(t)\} = \{Q(t)\} \quad (3.3)$$

con

$\{\ddot{u}(t)\}$: vettore dell'accelerazione

$[M]$: matrice delle masse

$\{\dot{u}(t)\}$: vettore della velocità

$[C]$: matrice degli smorzamenti

$\{u(t)\}$: vettore dello spostamento

$[K]$: matrice delle rigidezze

Generalizzando al caso dell'oscillatore multiplo, è possibile affermare che quando una forzante esterna contiene nel segnale una componente in frequenza prossima alla frequenza di risonanza della struttura, si può osservare l'amplificazione della risposta strutturale. Su ciò si basa l'identificazione dinamica, che riveste un ruolo fondamentale in quanto consente di conoscere i parametri dinamici di un sistema, comprendendone il comportamento dinamico.

3.4.4 Funzione di risposta in frequenza (FRF)

Per la descrizione del comportamento dinamico di un sistema meccanico è possibile ricorrere a un sistema lineare input-output, anche detto sistema LTI (Linear Time-Invariant system). Il sistema si basa su una corrispondenza lineare tra input e output.

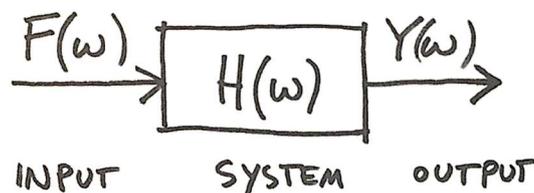


Figura 3.13. Rappresentazione schematica di un sistema input-output LTI

La descrizione di un sistema lineare può altresì avvenire definendo i parametri di risposta ad una eccitazione standard. Un primo descrittore è la funzione di risposta all'impulso (IRF): essa descrive la dinamica del sistema nel caso di input impulsivo.

Si parla invece di Funzione di risposta in frequenza (FRF) nel caso di forzante sinusoidale di ampiezza unitaria applicata ad ogni frequenza di un certo range. La FRF e la corrispondente IRF formano una coppia di trasformate di Fourier; la caratterizzazione dei sistemi oggetto di identificazione dinamica risulta pienamente definita dalla loro risposta impulsiva $h(t)$ o dall'equivalente nel dominio della frequenza, ossia la FRF, $H(f)$.

Al riguardo, si consideri il sistema elementare a un grado di libertà soggetto a forzante sinusoidale e si analizzi la sua risposta strutturale H , in termini di ampiezza e fase dell'oscillazione, al variare della frequenza di oscillazione.

- A frequenza nulla:
il termine elastico identificato nella rigidezza della molla prende il controllo della deformazione;
- A bassa frequenza:
è ancora la rigidezza a dominare la risposta, in fase con l'eccitazione;
- All'aumentare della frequenza:
l'influenza del termine di inerzia (massa) aumenta; sino a ω_0 , la frequenza naturale non smorzata (data dal rapporto tra 2π e il periodo proprio, T_0), per cui termine elastico e di inerzia si compensano ed è lo smorzamento a controllare la risposta H , che diventa

elevata. Si ha un ritardo di 90° della risposta (sfasamento) rispetto all'eccitazione, essendo in condizione di risonanza (se lo smorzamento fosse nullo).

- A frequenze maggiori di ω_0 :

il termine inerziale controlla la risposta, che diminuisce, con ritardo di 180° rispetto all'eccitazione.

Graficamente, ciò può essere sintetizzato e espresso dai seguenti grafici che mostrano la risposta strutturale $H(\omega)$ (ampiezza e fase) al variare della frequenza di eccitazione:

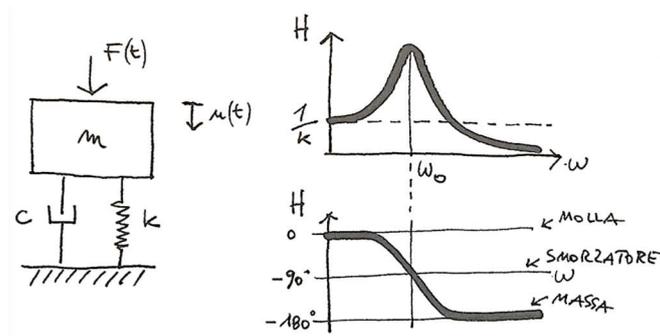


Figura 3.14. Comportamento del SDOF a forzante sinusoidale a frequenza variabile

La funzione $H(\omega)$ è detta funzione di trasferimento e può essere impiegata per esprimere analiticamente il comportamento in frequenza; essa racchiude l'azione di filtro esercitata dalla struttura. La funzione di trasferimento può essere ricavata dalla relazione:

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (3.4)$$

in cui $Y(\omega)$ e $F(\omega)$ rappresentano rispettivamente la trasformata di Fourier dell'input e quella dell'output. $H(\omega)$ contiene integralmente le caratteristiche del sistema e può, quindi, essere scritta come:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.5)$$

la soluzione completa, a cui si arriva dalla risoluzione dell'equazione del moto per forzante armonica, è descritta dalla Matrice di risposta in frequenza, $[H(\omega)]$. Racchiudendo l'azione di filtro della struttura, la FRF contiene i parametri dinamici del sistema e si può ricavare conoscendo l'input e misurando l'output.

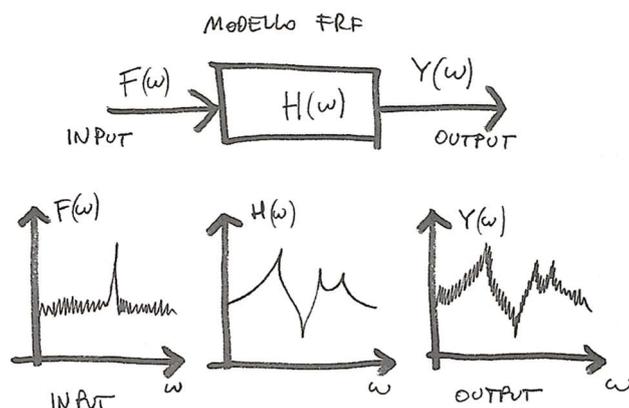


Figura 3.15. Modello FRF: input e output

La gestione della risposta in frequenza richiede la rappresentazione dei risultati nella forma complessa, con parte reale e parte immaginaria. Così, è possibile definire la risposta dinamica di una struttura per mezzo di una coppia di valori (ampiezza e fase o parte reale e parte immaginaria).

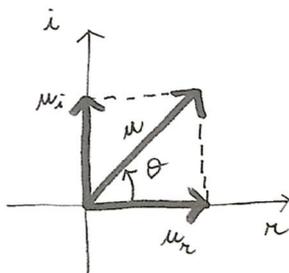


Figura 3.16. Rappresentazione complessa

3.4.5 Tecniche di identificazione dinamica

3.4.5.1 Le famiglie di procedure EMA e OMA

Con Analisi Modale Sperimentale (EMA) si intende quell'insieme di tecniche Input-Output, ossia che richiedono la conoscenza a priori dell'input artificiale e la misurazione dell'output tramite sensori. In passato, le scarse prestazioni dei sensori hanno fatto sì che questa tecnica fosse molto usata. Attualmente il suo impiego è rilevante e concentrato ai casi di correlazione risposta/input noto, pur presentando limiti notevoli legati all'esigenza di una eccitazione esterna, costi notevoli e pericolo di danneggiamento strutturale.

Di tutt'altra impostazione risulta, invece, l'altro tipo di Analisi Modale, quella Operazionale (OMA): le tecniche che fanno capo a tale classe si basano sulla misura della risposta strutturale alle azioni ambientali (in altri termini, *Ambient Vibration Survey*, AVS). Tale eccitazione esterna di input è incognita, rappresentando un segnale random, mentre la sola variabile nota è l'output, $Y(\omega)$, ossia la risposta strutturale. L'incognita della fonte di eccitazione ambientale è la ragione per cui questa tecnica viene anche detta "output-only modal analysis".



Figura 3.17. Rappresentazione schematica della modalità di identificazione dinamica

Avendo a che fare con un input incognito dal punto di vista analitico, si procede in termini probabilistici, formulando ipotesi di distribuzione statistica delle forze e derivando la teoria di identificazione dinamica.

Si assume che l'input sia un rumore bianco gaussiano stazionario: come il termine suggerisce, questo è caratterizzato da spettro piatto nel range di frequenze di interesse, dormendo così un'eccitazione a banda larga. Grazie ad essa, tutti i modi del sistema vengono eccitati in egual misura e lo spettro di output può contenere informazioni complete sulla struttura.

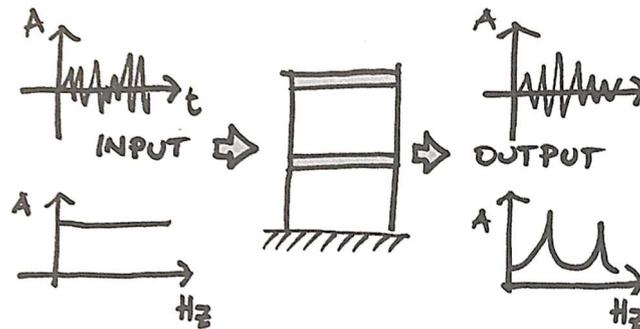


Figura 3.18. Sistema Input-Output con rumore bianco ($F(\omega)$) e misura della risposta strutturale ($Y(\omega)$)

Le applicazioni delle tecniche OMA sono molteplici: la principale è rappresentata dall'oggetto di tale tesi, ossia il controllo dello stato di salute della struttura nel tempo tramite misura di vibrazioni strutturali, da cui rilevare eventuali danneggiamenti e modifiche dei parametri dinamici.

I vantaggi delle tecniche OMA sono evidenti:

- Costo (minore delle tecniche EMA);
- Interferenza nulla con la normale operatività a cui la struttura è destinata, evitando interruzioni d'uso e funzionamento (es. traffico per i ponti);
- Rappresentatività diretta delle condizioni di funzionamento della struttura da parte della risposta misurata.

I pochi aspetti negativi riguardano l'impiego di strumentazione sensibile (per valutare la risposta a sollecitazioni di entità ridotta) e un'elaborazione dati accurata, avendo solo i dati di output.

3.4.5.2 Classificazione delle tecniche in base al dominio di implementazione

Le tecniche per l'identificazione dei parametri si possono classificare in base al dominio di rappresentazione, considerando che la descrizione del comportamento strutturale può avvenire mediamente un set di equazioni differenziali nel dominio temporale o un set di equazioni algebriche nel dominio della frequenza:

A) Metodi del dominio della frequenza:

basati sulla trasformata di Fourier dei segnali delle accelerazioni.

La FRF, infatti, contendendo tutte le informazioni sulle caratteristiche dinamiche, consente di descrivere il comportamento della struttura. La ricerca della soluzione del sistema chiave (3.3) sfrutta la trasformata di Fourier, consentendo di ottenere un sistema di equazioni algebriche, più semplici:

$$(M \cdot \omega^2 + C \cdot \omega + K) \cdot Y(\omega) = F(\omega) \quad (3.6)$$

in cui è possibile identificare la FRF espressa dalla (3.5).

Infine, procedure di curve fitting consentono di determinare, tramite poli e residui, le informazioni sui parametri modali.

B) Metodi del dominio del tempo:

basati sull'elaborazione diretta delle *time histories* dei segnali di uscita.

Il sistema di equazioni differenziali (14) viene risolto con riferimento alla matrice delle IRF, esprimibile come somma di risposte sinusoidali smorzate:

$$[I(t)] = \sum_{k=1}^m [|r_k| \cdot e^{-\sigma_k(t)} \cdot \sin(\omega_k \cdot t + \alpha_k)] \quad (3.7)$$

in cui m è il numero di modi di vibrare, $|r_k|$ e α_k sono le matrici dei residui in termini di ampiezza e di fase, σ_k è lo smorzamento modale e ω_k è la frequenza del modo. Anche in tal caso, procedure di curve fitting consentono la stima dei parametri modali.

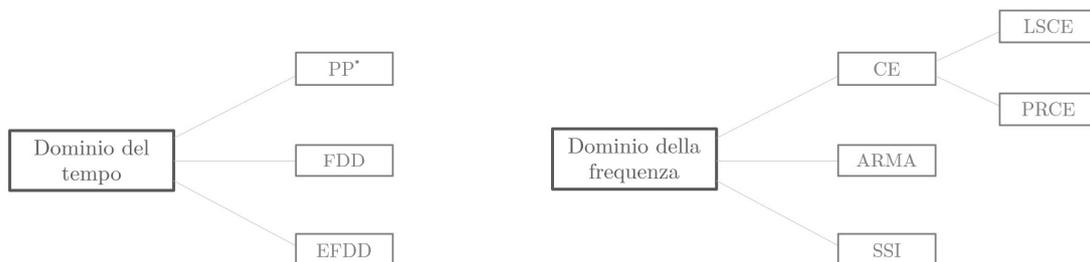


Figura 3.19. Classificazione degli algoritmi principali di identificazione dinamica (Nota: *EMA)

A) Metodi nel dominio delle frequenze

L'ipotesi di partenza dei numerosi algoritmi di tale gruppo è che in prossimità della frequenza di risonanza il modo da cui deriva l'amplificazione della risposta ha un contributo

preponderante nella definizione della funzione FRF. Le diverse tecniche differiscono tra loro per il modo in cui dalle FRF vengono ricavati i parametri modali.

Sebbene appartenga alle tecniche EMA, il riferimento al *Peak Picking* (**PP**) è doveroso per la semplicità del metodo, in cui le frequenze naturali si valutano dai picchi del grafico della magnitudine FRF, i modi di vibrazione dal rapporto tra picchi e gli smorzamenti dalla larghezza dei picchi.

Tornando alle tecniche OMA, su cui lo studio è incentrato, tra i metodi di identificazione più avanzati si colloca la **FDD** (Frequency Domain Decomposition). Il concetto di base è che gli autovettori, rappresentazione dei modi di vibrare, formano una base: ogni spostamento può essere rappresentato da una loro combinazione lineare. Questa proprietà di disaccoppiamento delle componenti dei vari modi può essere estesa anche alla densità spettrale (PSD), ricorrendo alla scomposizione ai valori singolari (SVD) della matrice della PSD ad ogni frequenza.

L'algoritmo Enhanced Frequency Domain Decomposition (**EFDD**) prevede la scomposizione del segnale nelle sue frequenze principali tramite analisi FDD e la sua ricostruzione nel dominio del tempo per mezzo di una trasformazione inversa.

B) Metodi nel dominio del tempo

Gli algoritmi nel dominio temporale hanno le proprie radici in settori come la teoria dei sistemi e l'ingegneria del controllo e le loro basi teoriche sono state descritte da Ljung⁷⁰ e da van Overschee & De Moor⁷¹.

I modelli matematici sono composti da equazioni alle differenze nella variabile tempo, la cui risoluzione consente di valutare le proprietà modali della struttura.

Tali modelli possono essere ricondotti a 2 famiglie:

1. Modelli ingresso-uscita:
anche detti modelli a rappresentazione esterna in quanto considerano solo le variabili osservate;
2. Modelli di stato:
si dicono modelli a rappresentazione interna e fanno ricorso a variabili ausiliare, dette variabili di stato. Una modalità conveniente di risoluzione di tali modelli è costituita dagli algoritmi a sottospazi: si parla così di identificazione con metodi a sottospazi. Questi metodi sono basati sulla manipolazione di matrici.

Il metodo più semplice nel dominio del tempo è chiamato metodo Complex Exponential (**CE**): questo prevede la stima dei modi di vibrare dai residui della FRF, determinati tramite tecnica dei coefficienti di autoregressione. Da questa tecnica derivano il Least-Square Complex

⁷⁰ Ljung L., *System Identification – Theory for the user*, 1987

⁷¹ P. Van Overschee and B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Application*, Kluwer Academic Press Dordrecht (The Netherlands), 1996

Exponential (**LSCE**) e il Polyreference Complex Exponential (**PRCE**). Uno tra i metodi più complessi è l'Autoregressive Moving-Average Method (**ARMA**): in esso i parametri modali costituiscono le incognite di un'equazione differenziale lineare discretizzata nel tempo. Infine, un metodo parametrico avanzato è lo Stochastic Subspace Identification (**SSI**): i modi di vibrare si ricavano in modo analitico dalla stima diretta delle matrici di stato, rispetto alle quali avviene la risoluzione del problema.

3.4.6 Teoria matematica alla base degli algoritmi di identificazione dinamica

Il seguente paragrafo è dedicato alle basi teoriche delle tecniche trattate, con particolare riferimento al dominio del tempo e, ancora più nello specifico, alla SSI. Gli algoritmi infatti sono implementati nei software di identificazione ad uso commerciale e presentano interfacce grafiche che ne semplificano l'uso; il professionista deve però sempre avere il controllo del processo in atto, per cui una conoscenza (almeno di base) della matematica dietro le tecniche è fondamentale per non avere solo dei numeri, bensì dei risultati.

3.4.6.1 Equazione del moto e modelli dinamici strutturali

L'equazione dinamica del moto costituisce la base per la comprensione degli algoritmi di identificazione tramite i quali estrarre i parametri dinamici.

Costituendo un potente strumento analitico per descrivere fenomeni dinamici basati su processi stocastici, in tale contesto l'attenzione viene fissata sui modelli nel dominio del tempo. Nel dominio temporale una serie di equazioni differenziali consente la rappresentazione della dinamica di una struttura.

Infatti, nel dominio di interesse generalmente la descrizione del comportamento dinamico degli N-DOF discreti di un sistema MDOF generale avviene esprimendo l'insieme di equazioni differenziali lineari del 2° ordine in forma matriciale (equazione (3.3)). Si è soliti indicare tale equazione matriciale del moto come *modello spaziale*. Nell'ambito dei modelli dinamici strutturali per la descrizione del sistema, tale modello definisce la formulazione classica, a cui si contrappongono i *modelli di stato*.

La costruzione del modello di stato consente di ricondurre il problema di 2° ordine in 2 problemi di 1° ordine, definiti dall'*equazione di stato* e dall'*equazione di osservabilità*. Questo passaggio tramite l'introduzione della soluzione nello spazio delle fasi è il modo più semplice per passare dalla formulazione al continuo a quella discreta.

- 1) Dall'equazione di 2° ordine del moto è possibile scrivere l'equazione di stato nella forma nel tempo continuo (pedice "c"):

$$\dot{x}(t) = A_c \cdot x(t) + B_c \cdot r(t) \quad (3.8)$$

in cui

$$x(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix}: \text{vettore di stato}$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}: \text{matrice degli stati}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}: \text{matrice degli input o dei carichi}$$

$$r(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix}: \text{vettore delle forze esterne}$$

- 2) Per l'equazione di osservabilità è necessario partire dalla constatazione che, in una prova di identificazione dinamica, degli infiniti gradi di libertà reali, ne vengono tenuti in conto solo un numero pari ai punti della struttura monitorati nella prova. Per cui è possibile derivare:

$$y(t) = C_a \cdot \ddot{u}(t) + C_v \cdot \dot{u}(t) + C_d \cdot u(t) \quad (3.9)$$

in cui

$y(t)$: vettore degli output

C_a : matrice degli output per le accelerazioni

C_v : matrice degli output per le velocità

C_d : matrice degli output per lo spostamento

Il modello di stato in tempo continuo viene ricavato dalla combinazione delle suddette informazioni:

$$\dot{x}(t) = A_c \cdot x(t) + B_c \cdot r(t) \quad (3.10)$$

$$y(t) = C_a \cdot \ddot{u}(t) + C_v \cdot \dot{u}(t) + C_d \cdot u(t)$$

Questa formula ha il vantaggio di presentare la soluzione nella forma nota di Kailath⁷²:

$$x(t) = \underbrace{e^{(A_c \cdot t)} \cdot x_{(0)}}_{\text{al discreto}} + \int_0^t e^{[A_c \cdot (t-\tau)]} \cdot B_c \cdot f_{(\tau)} d\tau \quad (3.11)$$

$$\downarrow$$

$$e^{(A_c \cdot k\Delta t)} \cdot x_{(0)} \text{ (forma *) con } e^{(A_c \cdot k\Delta t)} = A_d^k \text{ e } A_d = e^{(A_c \cdot \Delta t)}$$

A questo punto, considerato che le prove sperimentali si effettuano ad istanti discreti Δt (tempo di campionamento) e non ad ogni istante di tempo, si deve procedere con la conversione del *modello di stato al tempo discreto*. La discretizzazione delle equazioni di tempo continuo viene svolta definendo innanzitutto il Δt , inverso della frequenza di campionamento e operando, quindi, le seguenti sostituzioni:

$$t = (k + 1) \cdot \Delta t \quad \text{con } k \in \mathbb{N} \quad (3.12)$$

$$t_0 = k \cdot \Delta t$$

⁷² T. Kailath: *Linear Systems*. Prentice Hall Inc., 1980

in cui t indica gli istanti discreti di risoluzione delle equazioni.

Per cui, si ottiene:

$$x_{(k+1)\Delta t} = e^{A_c \cdot k\Delta t} \cdot x_{(0)} + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{\{A_c \cdot [(k+1)\Delta t - \tau]\}} \cdot B_c \cdot f_{(\tau)} d\tau \quad (3.13)$$

Assumendo un input $f_{(\tau)}$ costante nell'intervallo tra $k\Delta t$ e $(k+1)\Delta t$ e definendo $\tau' = (k+1)\Delta t - \tau$:

$$x_{(k+1)\Delta t} = e^{A_c \cdot k\Delta t} \cdot x_{(0)} + \left[\int_0^{\Delta t} e^{(A_c \cdot \tau')} \cdot B_c d\tau \right] \cdot f_{(k\Delta t)} \quad (3.14)$$

Le notazioni per la descrizione del modello a tempo discreto nello spazio delle fasi sono:

$$\begin{aligned} A &= A_d = e^{(A_c \cdot \Delta t)} & x_{k+1} &= x_{(k+1)\Delta t} \\ B &= \int_0^{\Delta t} e^{(A_c \cdot \tau')} \cdot B_c d\tau & r_k &= f_{(k\Delta t)} \end{aligned}$$

Ottenendo il modello al tempo discreto:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A \cdot x_k + B \cdot r_k \\ y_k &= C \cdot x_k + D \cdot r_k \end{aligned} \quad (3.15)$$

in cui

[A]: discrete state matrix	$x_k = x_k(\Delta t)$: vettore degli stati a tempo discreto
[B]: discrete input matrix	r_k : input
[C]: discrete output matrix	$y_k = y(k\Delta t)$: output
[D]: discrete transmission matrix	

La risposta strutturale al tempo discreto in genere si rappresenta con una matrice del tipo:

$$[Y] = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_N] \quad (3.16)$$

con N : numero di campionamenti e y_i : vettore i -esimo di dimensione m che rappresenta la risposta strutturale degli m punti di misura all' i -esimo istante di campionamento

($y = \{ y_1 \quad \dots \quad y_m \}^T$).

Arrivati alla costruzione del modello di stato, nel paragrafo successivo verrà trattata la procedura analitica per l'estrazione dei parametri modali, la quale andrà a culminare in sostanza nella scomposizione agli autovalori della matrice del sistema [A].

3.4.6.2 Stochastic Subspace Identification (SSI)

I modelli nel dominio del tempo sono comunemente impiegati per l'identificazione dinamica di strutture sottoposte a carichi ambientali.

Tra tali tecniche, la SSI è una delle principali e più riconosciute dalla comunità ingegneristica, nonché uno dei metodi di Output-Only Modal Analysis più potenti.

Proposta da van Overschee e De Moor, la teoria matematica alla base di tale algoritmo è molto complessa; una pubblicazione di Brincker e Andersen⁷³ fornisce una valida spiegazione ingegneristica del metodo.

A partire dal fatto che le matrici contenenti il segnale misurato possono essere interpretate come un o spazio vettoriale, si parla di “metodi a sottospazi” (subspace) dato che:

- Le colonne di tale matrice rappresentano una base di vettori;
- Le righe consentono di ricavare le stime delle matrici del sistema, tramite la costruzione di filtri di Kalman.

Pur trattandosi di un modello deterministico, dal tipo di ingresso che lo governa, il carattere random dell’input (es. vento) rende necessaria l’inclusione delle componenti stocastiche nel modello, in termini di rumore, ottenendo la formulazione stocastica a modelli di stato a tempo discreto:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A \cdot x_k + B \cdot r_k + w_k \\y_k &= C \cdot x_k + D \cdot r_k + v_k\end{aligned}\tag{3.17}$$

con

w_k : rumore dovuto all’inaccuratezza del modello

v_k : rumore dovuto all’inaccuratezza dei sensori

Considerata l’ignoranza dell’input $\{r\}$, l’algoritmo prevede la sua modellazione in modo implicito per mezzo del rumore, nei termini w_k e v_k . In questo modo si ottiene la formulazione a tempo discreto del modello di stato stocastico:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A \cdot x_k + w_k \\y_k &= C \cdot x_k + v_k\end{aligned}\tag{3.18}$$

Così le matrici [B] e [D] vengono integrate nei termini di rumore e tale equazione rappresenta un modello con forzante rappresentata da rumore bianco.

Il sistema è governato dalle matrici [A] e [C], dette “matrici di sistema”: determinate, da esse può avvenire l’estrazione analitica dei parametri modali.

I passi fondamentali dell’algoritmo SSI sono i seguenti.

1. Definizione della matrice di Hankel

Viene definita in tale metodo come insieme di matrici create tramite traslazione della matrice degli output, Y:

$$Y_l \begin{bmatrix} Y_{1:N-2s} \\ Y_{2:N-2s+1} \\ \vdots \\ Y_{2s:N} \end{bmatrix} = = \begin{bmatrix} Y_{hp} \\ Y_{hf} \end{bmatrix}\tag{3.19}$$

⁷³ Brincker, R., & Andersen, P. (2006). *Understanding Stochastic Subspace Identification*. In Conference Proceedings: IMAC-XXIV : A Conference & Exposition on Structural Dynamics Society for Experimental Mechanics.

Y_{hp} : parte superiore della matrice, definita passato

Y_{hf} : parte inferiore della matrice, definita futuro

Il numero di traslazioni è $2s$, numero di blocchi di righe; un blocco di righe ha un numero di righe pari agli output (numero di sensori applicati).

2. Proiezione del futuro sul passato

Tale operazione è spiegata per via geometrica da van Overschee e De Moor. La proiezione definisce la matrice $[H]$ ed è attuata come media condizionata. Tale tipo di media per i processi gaussiani può essere integralmente descritta dalla sua covarianza. Dato che anche le matrici di dati traslati definiscono covarianze, la proiezione può essere calcolata direttamente nella forma di van Overschee e De Moor:

$$[H] = E(Y_{hf}|Y_{hp}) \quad (3.20)$$

$$[H] = \frac{[Y_{hf}] \cdot [Y_{hp}]^T \cdot ([Y_{hp}] \cdot [Y_{hp}]^T)^{-1} \cdot [Y_{hp}]}{\quad} \quad (3.21)$$

definisce la covarianza

$[H]$ è detta Subspace Matrix (matrice del sottospazio): le sue colonne sono decadimenti liberi del sistema, associati alla media condizionata, per condizioni iniziali di Y_{hp} ancora incognite.

La colonna generica di $[H]$, usando la forma *, si può definire come:

$$\{H_{col}\} = [O] \cdot \{x_0\} \quad (3.22)$$

detta $[O]$ la matrice di osservabilità (observability matrix):

$$[O] = \begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \\ C \cdot A^2 \\ \vdots \\ C \cdot A^{s-1} \end{bmatrix}$$

da cui trovare le condizioni iniziali.

In generale, si ha:

$$[H] = [O] \cdot [X_0] \quad (3.23)$$

3. Stati di Kalman

Sono proprio le condizioni iniziali per tutte le colonne di $[H]$; $[X_0]$ contiene gli stati di Kalman a t_0 per tutte le colonne di $[O]$. gli stati di Kalman vengono valutati ricorrendo alla decomposizione ai valori singolari (SVD) di $[H]$:

$$[H] = [U] \cdot [S] \cdot [V]^T \quad (3.24)$$

con

$[S]$: matrice diagonale non negativa;

$[U]$, $[V]$: matrici unitarie

La stima di $[O]$ e di $[X_0]$ è data da:

$$[\hat{O}] = [U] \cdot [S]^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

$$[\hat{X}_0] = [S]^{\frac{1}{2}} \cdot [V]^T \quad (3.26)$$

$[\hat{X}_0]$: matrice degli stati di Kalman per l'istante zero

La stima della matrice degli stati di Kalman per istanti successivi a quello iniziale (e così di tutti gli stati di Kalman) si ottiene facendo la stessa operazione ma rimuovendo in maniera sequenziale tutti i blocchi: ad es., per t_i si deve rimuovere il 1° blocco di righe di $[H]$ e l'ultimo blocco di righe di $[O]$.

4. Stima delle matrici di sistema, $[A]$ e $[C]$

Le system matrices vengono definite dalla matrice di osservabilità $[O]$.

- 1) La matrice di transizione di stato (state transition matrix) $[A]$ può essere ricavata da $[O]$ rimuovendo il 1° blocco di righe e dopo l'ultimo:

$$[\hat{O}_{2:s}] \cdot [\hat{A}] = [\hat{O}_{1:s-1}] \quad (3.27)$$

in cui $[A]$ si determina da formula inversa, considerando la pseudoinversa di Moore-Penrose.

- 2) La matrice di osservazione $[C]$ si può ricavare dal 1° blocco di righe di $[O]$:

$$[\hat{C}] = [\hat{O}_{1:1}] \quad (3.28)$$

5. Analisi modale

La decomposizione agli autovalori della matrice $[A]$ consente di definire i parametri modali⁷⁴:

$$[\hat{A}] = [\Psi] \cdot [\lambda_{d_j}] \cdot [\Psi]^{-1} \quad (3.29)$$

con λ_{d_j} : autovalori tempo discreto (pedice "d").

Gli autovalori della matrice di stato (scritta dalla forma discreta alla corrispondente al continuo, A_c) sono in forma complessa coniugata e si possono scrivere come:

$$\lambda_{c_j}, \lambda_{c_j}^* = \xi_j \cdot f_j \pm j \cdot f_j \cdot \sqrt{1 - \xi_j^2} \quad (3.30)$$

Da cui:

$$\lambda_{c_j} = \frac{\ln(\lambda_{d_j})}{t_s}: \text{autovalori al continuo (pedice "c")}$$

$$\omega_j = |\lambda_{c_j}|$$

$$f_j = \frac{\omega_j}{2\pi}: \text{frequenza propria del modo } j$$

$$\xi_j = \frac{\text{Re}(\lambda_{c_j})}{|\lambda_{c_j}|}: \text{rapporto di smorzamento del modo } j$$

La matrice delle forme modali è data da:

⁷⁴ Ewins D.J., *Modal Testing: Theory and Practice*. Letchworth, England, 1984

$$[\Phi] = [C] \cdot [\Psi] \quad (3.31)$$

da cui è possibile ricavare le forme modali φ_j di Φ dagli autovettori Ψ .

3.4.7 Fasi principali di un monitoraggio dinamico

Questa sezione dell'elaborato è dedicata alle basi fondamentali della procedura che consente di identificare i parametri dinamici di una struttura: in sintesi, stima e validazione dei parametri modali.

La comprensione della filosofia della tecnica passa inevitabilmente dall'analisi di tale procedura con cui estrarre i parametri modali, dalla registrazione delle *time histories* delle accelerazioni all'attuazione degli algoritmi.

Come schematicamente rappresentato da Fig. 3.20, le fasi principali della procedura sono:

- 1) *Pianificazione della prova:*
installazione dei sensori sulla struttura oggetto di monitoraggio;
- 2) *Acquisizione delle accelerazioni:*
associata all'impostazione della corretta frequenza di campionamento;
- 3) *Pre-processing dei segnali acquisiti:*
pulizia dei segnali da disturbi e verifica della correttezza del salvataggio dati;
- 4) *Algoritmo di identificazione:*
per l'estrazione dei parametri modali, con particolare riferimento alla SSI;
- 5) *Rappresentazione delle forme modali;*
- 6) *Validazione del modello e model updating:*
confronto dei parametri modali ottenuti sperimentalmente con quelli derivanti da modellazione FEM.

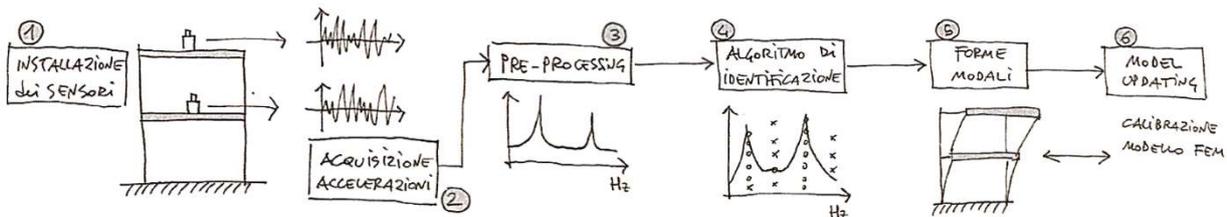


Figura 3.20. Procedura di identificazione dinamica

Al fine di fornire un riscontro pratico alle nozioni introdotte, favorendo la loro comprensione, tale procedura viene approfondita facendo riferimento ad un archetipo didattico: un sistema a tre gradi di libertà, con cui si potrebbe pensare di schematizzare, ad esempio, un edificio di tre piani. Ripercorrendo passo passo e qualitativamente le fasi del monitoraggio dinamico applicate a tale sistema sarà possibile dare un senso compiuto ai concetti teorici su cui si basa l'identificazione dinamica.

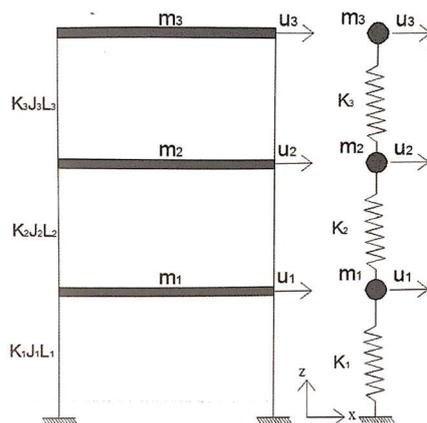


Figura 3.21. Archetipo: schematizzazione strutturale del sistema 3-DOF

Per il modello di struttura associato a questa schematizzazione strutturale si intende eseguire un'identificazione dinamica tramite tecnica OMA; innanzitutto, quindi, si procede con la strumentazione del sistema e si ipotizza di avere a disposizione la risposta strutturale alle vibrazioni ambientali.

I. Pianificazione della prova

L'operazione iniziale del monitoraggio consiste essenzialmente nell'installazione dei sensori. Tale fase presuppone una conoscenza di base della struttura in termini di tipologia strutturale e architettonica, da cui il comportamento dinamico dipende, ma non solo: è appropriato formulare a priori una ipotesi sui modi principali da identificare. Questi, infatti, influenzano in modo diretto gli aspetti legati a questa prima fase del processo: la direzione dei sensori, la scelta dei punti da monitorare, la selezione del supporto dei sensori, la disposizione dei cavi.

Per quanto riguarda la direzione dei sensori, nel caso di monitoraggio di un ponte i sensori sono da installarsi almeno nella direzione verticale z , dato che qui si attendono i modi propri principali; se invece fosse una torre ad essere sottoposta a monitoraggio, si dovrebbero considerare le direzioni nel piano x e y .

In teoria, la selezione dei punti da monitorare andrebbe fatta prendendo in conto tutti i punti significativi per la valutazione del comportamento strutturale; nella pratica, però, è necessario fare i conti con la limitatezza di risorse, finanziarie e logistiche. In ogni caso, è necessario installare un numero minimo di strumenti, sufficienti per ottenere le informazioni richieste dalla procedura.

La collocazione dei sensori è da compiersi considerando che alcune posizioni sono ottimali per alcuni modi ma non per altri: gli accelerometri non devono essere posizionati in corrispondenza dei *odi modali* (punti di annullamento del modo), dato che l'osservabilità dei nodi è ivi nulla.

In aggiunta, il supporto per il fissaggio dei sensori deve essere solidale con la struttura portante: in questo modo, si verifica il corretto trasferimento delle vibrazioni della struttura al supporto e, infine, la idonea acquisizione da parte degli accelerometri.

Un ulteriore aspetto riguarda i cavi. Al fine di evitare l'introduzione di un errore nel segnale (rumore o disturbi generici), è necessario evitare l'aggrovigliamento dei cavi. Inoltre, i cavi vanno fissati, in modo che non oscillino, evitando così l'immissione di una componente in frequenza nel segnale, dovuta al moto della massa del cavo.

Nel caso dell'archetipo in esame, si ipotizza che il modello sia strumentato con 4 accelerometri nella direzione principale di spostamento x , uno per livello.

II. Acquisizione delle accelerazioni

Avendo installato gli accelerometri, le acquisizioni dinamiche possono avere inizio.

Il parametro principale dell'acquisizione da impostare è la frequenza di campionamento: per le acquisizioni dinamiche, in genere si considera una frequenza di 1000 Hz, ossia mille campioni al secondo.

Per quanto riguarda la durata delle acquisizioni, essa deve essere sufficiente per poter evidenziare i picchi di risonanza. Così, in genere, le *time histories* durano da 30 a 60 minuti. Inoltre, in modo da avere un set di dati ulteriore, è sempre bene realizzare almeno due acquisizioni.

Durante le rilevazioni, infine, non devono esserci disturbi esterni che compromettano la qualità dell'acquisizione (evitare, ad es., sensori vicino a condizionatori).

Con riferimento all'archetipo, le acquisizioni possono presentarsi nella seguente forma:

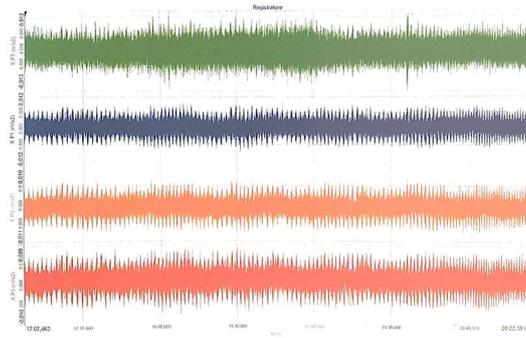


Figura 3.22. Acquisizione delle accelerazioni (white noise) da parte dei 4 accelerometri

III. Pre-processing dei segnali acquisiti

Concluse le acquisizioni, il segnale subisce una prima elaborazione che consiste nella pulizia dalle frequenze non di interesse e delle componenti armoniche non desiderate.

Subito dopo l'acquisizione, la verifica della qualità del contenuto in frequenza del segnale avviene direttamente nel software di acquisizione tramite il calcolo della trasformata veloce di Fourier (Fourier Fast Transform – FFT). L'applicazione dell'algoritmo FFT consente di

visualizzare il segnale nel dominio della frequenza ed è il primo controllo qualitativo dei segnali. Infatti, i grafici in frequenza mostrano in modo chiaro i principali picchi di risonanza. Così dal dominio temporale si è passati a quello della frequenza.

Segue un primo filtraggio dei dati eseguito tramite un filtro passo-alto che consente di eliminare le componenti a bassa frequenza (in genere tra 0 e 0.2 Hz) che non costituiscono frequenze di risonanza del sistema, bensì disturbo del segnale in prossimità dell'origine.

Il pre-processing si conclude con il ricampionamento dei dati tramite decimazione. Questa procedura consente di ridurre la quantità di dati da fornire all'algoritmo di identificazione senza modificare il contenuto in frequenza del segnale. È tipica l'applicazione di un fattore di decimazione 10, consistente nel passaggio da una frequenza di acquisizione di 1000 Hz ad una frequenza finale di 100 Hz.

Nel caso del 3-DOF in esame, a titolo esemplificativo, si ipotizzi di assumere i seguenti segnali filtrati:

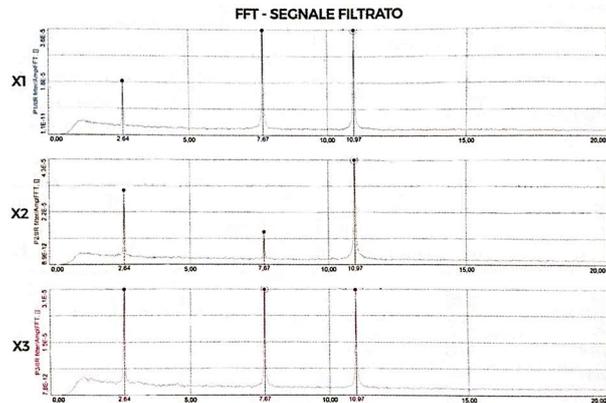


Figura 3.23. Grafici FFT dei segnali degli accelerometri (1,2,3) dopo l'applicazione dei filtri

In questo caso la frequenza di taglio del filtro passo-alto è di 1 Hz, eliminando i contributi tra 0.00 Hz e 1.00 Hz. Tali segnali filtrati vengono poi decimati, con fattore di decimazione 10. Una volta esportate singolarmente, le time histories possono essere immesse nell'algoritmo di identificazione.

IV. Algoritmo di identificazione

A questo punto può avvenire l'analisi dei dati da parte dell'algoritmo di identificazione. Il software di identificazione processa i segnali, importati come file di testo, ad esempio in formato *txt*, eseguendo l'estrazione dei parametri modali. In tale fase la verifica della correttezza dell'estrazione viene svolta tramite controlli finalizzati alla selezione dei modi stabili e allo scarto dei modi numerici: l'algoritmo genera il *diagramma di stabilizzazione*.

Infatti, una questione che attanaglia i metodi nel dominio del tempo, e in particolare le tecniche di identificazione basate sulla teoria a modelli di stato, è la decisione a priori dell'ordine del sistema (ossia il numero di gradi di libertà o numero di modi da identificare); essa

può inficiare notevolmente la bontà dei risultati, avendo a che fare con strutture reali, dotate di un numero non limitato di gradi di libertà. L'algoritmo di identificazione risolve la problematica attuando una strategia che consiste nella scelta di un intervallo di ordini del modello e nella esecuzione reiterata dell'identificazione per i diversi ordini del sistema di tale range.

Questo modus operandi comporta la produzione di molti valori dei parametri dinamici con la comparsa inevitabile di *noise modes*, ossia modi (o poli) spuri, instabili o matematici in quanto generati analiticamente dall'algoritmo, da scartare rispetto ai *real modes*, cioè i modi reali, fisici o stabili. La procedura di controllo e isolamento dei modi spuri viene chiamata "test di stabilità", consentendo di distinguere i modi stabili da quelli instabili grazie all'analisi dei valori dei parametri modali ottenuti per i diversi ordini. Innanzitutto vengono introdotti tre parametri di confronto, ciascuno corrispondente ad un parametro modale, ai quali associare un valore soglia di accettazione nell'ambito del criterio di confronto dei modi duali derivanti da diversi ordini:

$$\begin{aligned}
 (32.a): \quad \delta f &= \frac{|\Delta f|}{f} \\
 (32.b): \quad \delta \xi &= \frac{|\Delta \xi|}{\xi} \\
 (32.c): \quad \text{MAC} &= \varnothing_1, \varnothing_2 = \frac{|\varnothing_1^T \varnothing_2^*|^2}{(\varnothing_1^T \varnothing_1^*)(\varnothing_2^T \varnothing_2^*)}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

in cui:

(32.a) e (32.b) riguardano la variazione percentuale di frequenza e di rapporto di smorzamento, rispettivamente;

(32.c) invece è un coefficiente di correlazione chiamato MAC (Model Assurance Criterion) usato per il confronto delle forme modali per mezzo di un numero compreso tra 0 e 1, il quale vale 1 nel caso di coincidenza delle forme modali.

Da tali parametri è possibile eseguire il test di stabilità di un determinato modo, una volta fissati i valori soglia di accettazione, i quali dipendono dalla qualità delle analisi, dai dati e dall'accuratezza con cui si intende pulire il diagramma. I tipici criteri di stabilizzazione definiti dall'utente sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{|f(n)-f(n+1)|}{f(n)} < 0.01 \\ \frac{|\xi(n)-\xi(n+1)|}{\xi(n)} < 0.05 \\ [\text{MAC}(\{\varphi(n)\}, \{\varphi(n+1)\})] > 0.95 \end{array} \right. \tag{3.33}$$

ossia:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta f < 0.01 & (34.a) \\ \delta \xi < 0.05 & (34.b) \\ \text{MAC} > 0.95 & (34.c) \end{array} \right. \tag{3.34}$$

In altri termini, un polo viene etichettato come stabile se:

- (34.a) la dispersione tra le stime della frequenza a due ordini di modello successivi è minore dell'1%;
- (34.b) gli smorzamenti tra due ordini consecutivi sono inferiori del 5%;
- (34.c) il MAC calcolato tra due ordini successivi vale almeno 0.95.

In caso favorevole, il polo può considerarsi uno dei modi propri della struttura in esame, ma solo dopo avere superato alcuni ulteriori test finali.

Tramite questa procedura basata sul confronto dei modi associati ad un ordine di modelli con quelli legati all'ordine inferiore, è possibile generare il diagramma di stabilizzazione, finalizzato per l'appunto alla separazione i modi stabili da quelli instabili per via grafica. Graficamente infatti è possibile mostrare la situazione del modello in maniera complessiva. Come mostrato da Figura 3.24 al riguardo dell'archetipo considerato, i punti verdi indicano il superamento del test di stabilità, mentre i punti rossi segnalano l'esito negativo del test. Partendo dalla constatazione che i modi naturali sono caratteristiche intrinseche della struttura e quindi invarianti rispetto all'ordine del modello, i modi naturali possono essere estratti aumentando l'ordine e valutando la stabilità del modo. Nel complesso il diagramma mostra l'allineamento dei poli stabili (linee verticali verdi), corrispondenti a determinate frequenze, per ordine del modello crescente: queste rappresentano le frequenze proprie del sistema (tre nel caso del 3-dof, come da grafico). In altri termini, il grafico definisce gli autovalori della matrice dinamica A del sistema, descrittivi i modi strutturali.

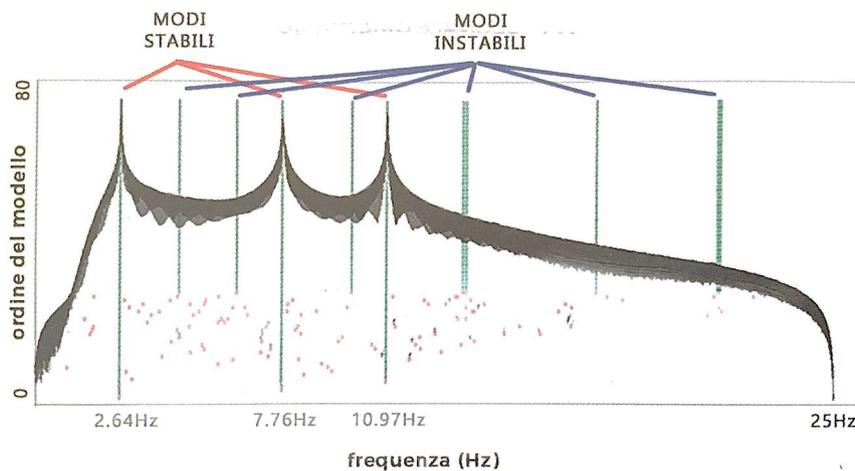


Figura 3.24. Diagramma di stabilizzazione generato per il sistema 3-DOF

In sintesi, nel caso dell'archetipo, questo trova diretta constatazione:

- L'elaborazione attuata dall'algorithmo di identificazione genera il diagramma di stabilizzazione (Figura 3.24);
- È chiaro l'allineamento dei poli stabili in corrispondenza dei picchi di risonanza, per ciascun ordine del modello;
- Si hanno anche altri allineamenti che però per bassi ordini del modello sono instabili (punti rossi), non superando il test di stabilizzazione.

I test finali sopra citati a cui il modo deve essere sottoposto per potersi considerare un modo proprio della struttura riguardano l'analisi delle forme modali.

V. Rappresentazione delle forme modali

La validazione dell'estrazione dei parametri modali passa attraverso ulteriori verifiche dei dati, per eseguire la selezione definitiva dei modi di vibrare.

1. L'analisi delle forme modali:

si parta dal fatto che i risultati delle tecniche OMA sono forniti in autovalori e autovettori in forma complessa, come visto. È necessario distinguere i modi reali (modi normali o normal modes) dai modi complessi: le forme modali si definiscono modi reali se sono rappresentate da valori reali (è il caso di strutture per cui è corretto l'impiego di modelli con smorzamento proporzionale), altrimenti si parla di modi complessi, a causa di smorzamento non proporzionale o errori nella stima dei parametri.

I modi possono essere analizzati facendo riferimento al classico dominio temporale oppure mediante un piano vettoriale, il *Complexity Plot*.

1a. Dominio temporale:

un modo reale può essere identificato in un'animazione corrispondente ad una forma modale dalla manifestazione delle oscillazioni massime e minima allo stesso istante di tempo; altrimenti l'animazione della forma modale è complessa.

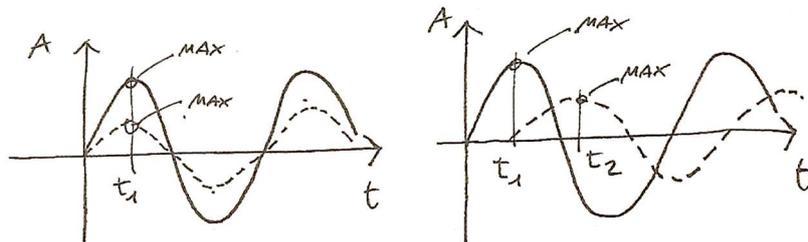


Figura 3.25. Dominio temporale: modo reale (sinistra) e modo complesso (destra)

1b. Diagramma polare o *Complexity Plot*:

si fa ausilio ad un piano vettoriale in cui ciascun vettore modale rappresenta una componente della forma modale. Il vettore modale ha origine in (0,0) e ha modulo, verso e fase, secondo le componenti reali e immaginarie. I “complexity” plots consentono, tramite ispezione visiva, di valutare il grado di complessità del modo: nel caso di forma modale corrispondente ad un modo reale, i vettori sono allineati lungo una direzione nel piano complesso (come deve accadere per le strutture civili, avendo a che fare con modi reali), altrimenti i vettori si dispongono in maniera caotica se il modo è complesso.

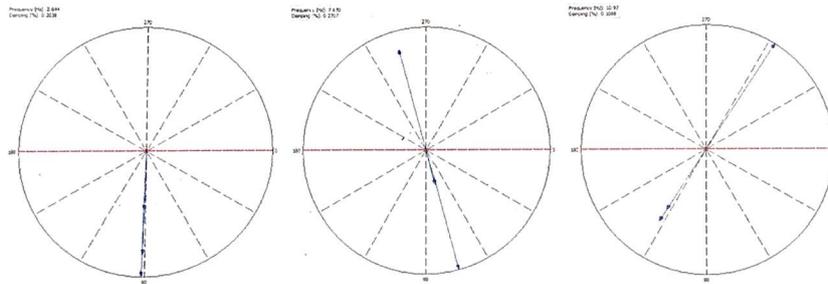


Figura 3.26. Complexity plot dei modi del 3-DOF

Figura 3.26 riguarda la rappresentazione nel diagramma polare dei modi stabili del sistema 3-DOF di riferimento. Come si può notare, i vettori modali sono allineati lungo una direttrice principale; di conseguenza, i modi di vibrare identificati sono reali e non hanno nessun grado di complessità.

2. La visualizzazione grafica delle forme modali identificate:

i modi di vibrare possono quindi essere visualizzati. La visualizzazione delle forme modali è il metodo più semplice di controllo preliminare dei risultati dell'identificazione. Essa può avvenire secondo due diversi approcci: display statico, per avere una immagine delle forme modali, e la visualizzazione dinamica, per averne un'animazione.

Tale operazione di visualizzazione passa attraverso la configurazione delle informazioni derivanti dall'estrazione dei parametri modali. I passaggi sono:

- *Realizzazione di un modello spaziale wireframe*: insieme di aste colleganti punti che rappresenta la struttura in modo schematico, senza informazioni su materiali, carichi o rigidità.
- *Identificazione nel modello wireframe dei punti monitorati*: a ciascun punto strumentato si associano direzione e verso dei sensori.
- *Assegnazione ad ogni punto monitorato delle informazioni derivanti dall'identificazione*: in modo da visualizzare il moto relativo dei punti nello spazio per un determinato modo di vibrare, in fase o in opposizione di fase rispetto alla direzione del sensore.

Nel caso del 3-DOF sotto osservazione, ciò si traduce in Figura 31:

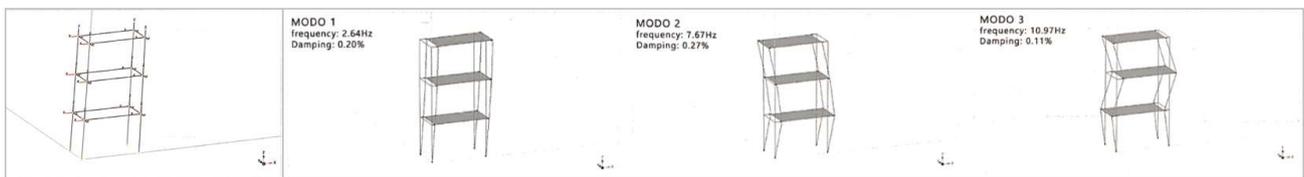


Figura 3.27. Modello wireframe dell'archetipo e rappresentazione statica delle corrispondenti 3 forme modali

In sintesi rispetto a quanto già detto, la visualizzazione delle forme modali dell'archetipo avviene costruendo il modello wireframe raffigurato, schematizzazione del sistema reale, e attribuendo in esso le informazioni dei segnali ai punti monitorati. Si assume ciascun piano come rigido, assegnando in modo semplificato ad ogni livello le medesime informazioni

dell'accelerometro corrispondente. L'associazione delle informazioni (frequenze e smorzamenti) dei complexity plots consente di osservare le forme modali, ossia come i punti monitorati si muovono reciprocamente tra loro, ad una determinata frequenza propria.

Ora l'identificazione dinamica è completata: può avvenire il confronto tra modi sperimentali e modi ottenuti dalle analisi a elementi finiti.

VI. Validazione del modello e model updating

Le informazioni dall'OMA possono essere a questo punto confrontate con le caratteristiche derivanti dai modelli FEM. Si parla di *model updating*, indicando la procedura di taratura dei modelli numerici sui parametri identificati per via sperimentale; essa mira ad ottenere modelli "identificati" sulla base dei dati sperimentali.

Infatti, errori ed incertezze caratterizzano i modelli FEM, relativamente a carichi applicati, semplificazioni di modellazione, come ad esempio le tamponature non modellate. La calibrazione del modello, che si dice quindi validato, fornisce uno strumento molto più affidabile per l'esecuzione di analisi strutturali e una rappresentazione accettabile del comportamento della struttura reale.

All'atto pratico, la procedura consiste nella variazione di alcuni parametri del modello FEM con l'obiettivo di ottenere un set di frequenze il più possibile prossimo a quello sperimentale. Per farlo esistono diverse tecniche; la calibrazione manuale dei parametri è senz'altro la più semplice e prevede l'intervento sulla modellazione delle tamponature esterne, la variazione delle masse o la definizione di una rigidità di piano finita. Ad esempio, quindi, il model updating si può svolgere introducendo le murature di tamponamento nella modellazione; lavorando su tale aspetto è possibile ottenere un grado di correlazione elevato per frequenze e forme modali.

Di seguito vengono analizzati le operazioni e gli strumenti a disposizione per il controllo dei parametri dinamici del modello basato sul confronto tra dati numerici e sperimentali nell'approccio di calibrazione del modello stesso.

1. Analisi delle frequenze proprie:

Il primo controllo riguarda i set di frequenze ricavati da analisi sperimentali e da calcoli numerici. È possibile distinguere due approcci per il confronto di due set di frequenze naturali.

1a. variazione percentuale:

il confronto tra i valori assoluti delle frequenze proprie può avvenire tramite il relativo scarto espresso in percentuale:

$$\Delta f_n = \frac{f_{2,n} - f_{1,n}}{f_{2,n}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.35)$$

in cui $f_{1,n}$ e $f_{2,n}$ sono i valori delle frequenze relativi all'n-esimo modo in esame: $f_{1,n}$ si riferisce al modello FEM, mentre $f_{2,n}$ riguarda il modello modale (ossia il modello sperimentale ottenuto dall'identificazione dinamica), entrambi per un determinato modo di vibrare.

1b. correlazione su piano cartesiano:

si riportano i due set di frequenze naturali in un piano cartesiano, associando un asse per ciascun set. Il primo set riguarda le frequenze identificate per via sperimentale, mentre il secondo set è costituito dai valori derivanti da modello FEM. La correlazione perfetta tra i due set si ha idealmente nel caso in cui i punti si allineano nella bisettrice del piano.

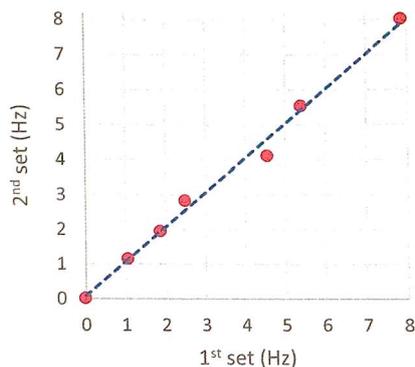


Figura 3.28. Confronto tra 2 set di frequenze proprie (modi numerici e modi sperimentali)

2. Comparazione delle forme modali:

il confronto tra forme modali viene generalmente risolto in modo efficace per mezzo di indici numerici, in modo quantitativo; il MAC⁷⁵ – Modal Assurance Criterion – si conferma lo strumento più comune in tal ambito.

Dati due set di forme modali corrispondenti, tale coefficiente di correlazione si calcola come:

$$MAC(\{\varphi_n^a\}, \{\varphi_n^e\}) = \frac{|\{\varphi_n^a\}^T \{\varphi_n^e\}|^2}{(\{\varphi_n^a\}^T \{\varphi_n^a\})(\{\varphi_n^e\}^T \{\varphi_n^e\})} \quad (3.36)$$

in cui:

$\{\varphi_n^a\}$ indicano le forme modali sperimentali e $\{\varphi_n^e\}$ indicano le forme modali numeriche, riferite all'n-esimo modo della struttura.

Nella sua variabilità tra 0 e 1, si evidenziano i due casi limite: la totale assenza di correlazione è identificata da $MAC=0$, mentre la perfetta correlazione tra i due set di forme modali è corrisposta dal valore unitario dell'indice.

Nella pratica, a partire dai modi sperimentali (N_m^e) e da quelli numerici (N_m^a), è possibile computare la matrice $MAC N_m^e \times N_m^a$:

⁷⁵ Allemang R.J., *A correlation coefficient for modal vector analysis*. BDL., Orlando, FL, USA: Proc. 1st SEM Int. Modal Anal. Conf., 1982

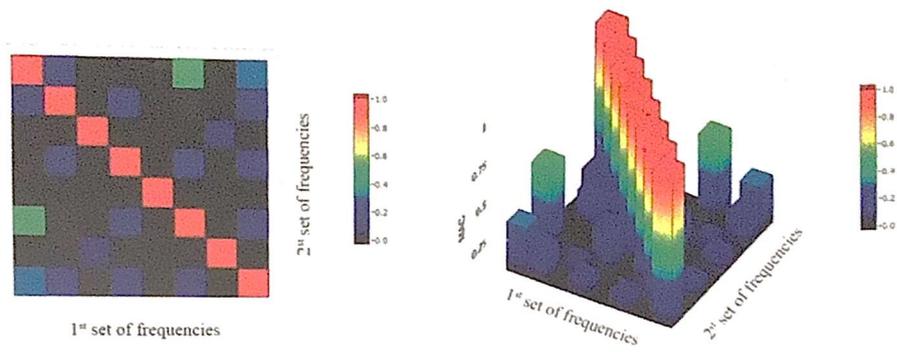


Figura 3.29. Confronto tra 2 set di forme modali - MAC

In questa forma, la correlazione delle forme modali dei due set viene segnalata dalla matrice MAC caratterizzata da valori vicini a 1 lungo la diagonale e valori più o meno nulli altrove. Al contrario, una matrice MAC distante da tale caso ideale rende necessarie modifiche del modello FEM, per minimizzare le differenze tra forme modali numeriche e sperimentali.

Parte II
Innovazione

Capitolo 4

Tecnologie emergenti

4.1 Introduzione

Questo capitolo si propone di inquadrare le tecnologie d'avanguardia in ambito di monitoraggio strutturale. Nello specifico, si considera la fibra ottica come mezzo per la realizzazione fisica di un sistema di monitoraggio, mentre dal punto di vista della gestione ottimale del processo di monitoraggio si studia l'implementazione basata sul BIM. Grazie al ridotto costo, a dimensioni e leggerezza, alla grande potenzialità associata all'implementazione e gestione intelligente del monitoraggio, nonché alle altre peculiarità esclusive di queste tecnologie, esse si pongono come interessanti strumenti in grado di facilitare il monitoraggio strutturale e farne emergere la notevole *applicabilità pratica*.

4.2 Fibre ottiche

Nei sensori che sono stati descritti nella parte precedente della trattazione l'esecuzione della misura è vincolata all'utilizzo di energia elettrica; questa loro caratteristica comune si porta dietro delle inevitabili limitazioni di utilizzo. Le moderne tecnologie in rapida diffusione si propongono di ovviare a tali problematiche e a tutta una serie di svantaggi dei sensori tradizionali. Su tutte, la tecnologia che utilizza le fibre ottiche si pone all'avanguardia.

Si tratta di un tubicino di vetro spesso quanto un capello nel quale viaggiano degli impulsi di luce. Questi impulsi non sono altro che informazioni digitali che vengono convertite in codice binario. Ad ogni 1 corrisponde un impulso di luce mentre ad ogni 0 corrisponde l'assenza di luce. Le informazioni possono viaggiare nel tubo di vetro grazie al principio fisico della riflessione interna totale. Vale a dire che se si proietta la luce nella fibra con una certa inclinazione, questa non attraversa il filamento di vetro ma viene riflessa al suo interno. Questo fenomeno permette di ingabbiare la luce facendola rimbalzare sulle pareti della fibra e quindi permettendo di trasmettere un segnale anche a lunghe distanze. Ad esempio, per i cavi sottomarini passano

diverse fibre, anche migliaia per il passaggio di dati in entrambe le direzioni, connettendo paesi anche da parti opposte dell'oceano.

4.2.1 La tecnologia a fibra ottica

I suddetti filamenti che consentono la trasmissione di segnali luminosi sono realizzati in materiale dielettrico, come vetro, quarzo o polimeri. Per ciò che concerne la geometria della fibra ottica, essa è costituita in sostanza da 3 strati concentrici:

1. Lo strato più interno è chiamato *core* o nucleo ed è deputato alla trasmissione vera e propria del segnale, per mezzo di un differente indice di rifrazione (n_1). La sua natura vetrosa dovuta all'alta percentuale di silice garantisce un campo elettromagnetico a frequenza ottica con limitatissime perdite di potenza e su grandi distanze;
2. Tali filamenti dell'ordine di 125 micrometri sono contenuti nel *cladding* o mantello, uno strato protettivo caratterizzato da un differente indice di rifrazione (n_2), in modo tale da sfruttare il principio della riflessione totale, consentendo al mantello di guidare l'onda luminosa. La superficie di discontinuità definita all'interfaccia nucleo-mantello rende possibile la trasmissione del segnale, rimanendo questo confinato nel nucleo;
3. Gli strati successivi possono essere categorizzati come *coating*, ossia ulteriori rivestimenti di protezione e guaine.

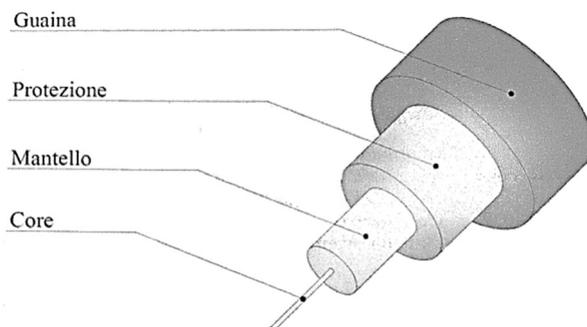


Figura 4.1. Schematizzazione di un cavo in fibra ottica⁷⁶

La distinzione delle fibre ottiche su base dimensionale vede contraddistinte le monomodali e le multimodali. La differenza sta nella dimensione del nucleo, molto più piccolo nelle prime rispetto alle seconde. Ciò porta con sé delle implicazioni sulla trasmissione dei segnali: le fibre monomodali possono trasmettere un solo raggio luminoso, mentre le multimodali consentono di tramettere più modi di propagazione.

⁷⁶ Manzone F., "Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici" - §5: Il monitoraggio delle strutture; §5.6: Nuove tecnologie emergenti: la fibra ottica

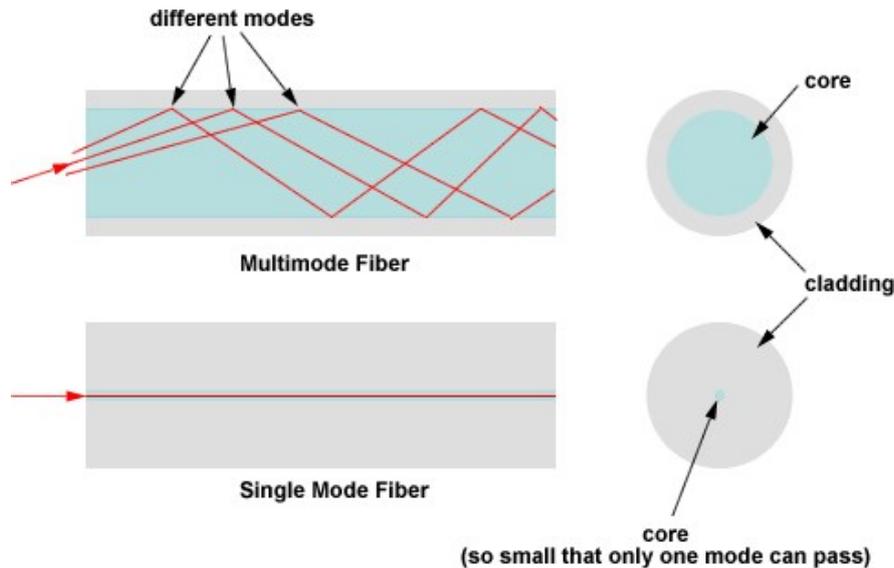


Figura 4.2. Fibra ottica monomodale e multimodale a confronto⁷⁷

La peculiarità della fibra ottica, a cui si deve gran parte del successo, è rappresentata dalla possibilità di moto curvo della luce (e non solo rettilineo come tradizionalmente accade).

Per comprendere adeguatamente il fenomeno⁷⁸ per cui la luce è in grado di viaggiare secondo un moto curvo, è bene approfondire il principio di funzionamento delle fibre ottiche. Come già introdotto, la trasmissione del segnale luminoso nella fibra avviene per riflessione totale, grazie ad un angolo di incidenza tra raggio luminoso e superficie di discontinuità dell'indice di rifrazione maggiore o uguale ad un angolo critico. Esso permette di avere totale riflessione del segnale, con perdita di potenza nulla, essendo assente la componente rifratta.

Si parta, però, dalla situazione di moto del segnale attraverso due differenti mezzi di propagazione; si verifica il fenomeno della rifrazione, per cui la direzione di propagazione si modifica secondo la legge di Snell:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (4.1)$$

⁷⁷ <https://www.studiotarantelli.it/articoli/fibra-ottica-e-smart-city.htm>

Studio Tarantelli, "La fibra ottica e la connessione <veloce> per una città moderna"

⁷⁸ Ansari F., State-of-the-art in the Applications of Fiber Optic Sensors to Cementitious Composites, Cement & Concrete Composites, 19 (1), 3-19, 1997

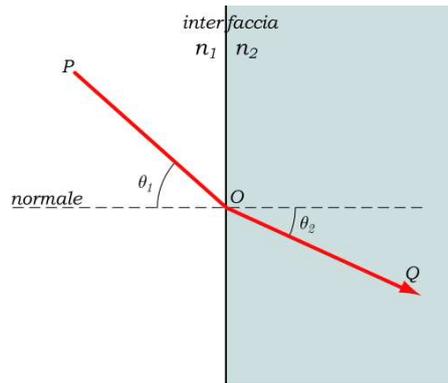


Figura 4.3. Legge di Snell⁷⁹

Come proposto da *Willebrord Snel van Royen* (da cui la suddetta legge), è possibile definire un angolo limite θ_{cr} , tale che, se $\theta_1 = \theta_{cr}$, allora $\theta_2 = 90^\circ$, ossia la componente rifratta non è più presente. Tale angolo limite può essere calcolato in funzione del suo seno, che risulta pari al rapporto tra n_2 e n_1 . Generalizzando, è possibile affermare che per un angolo di incidenza, θ_1 , maggiore o uguale a θ_{cr} si avrà la riflessione totale interna.

Alla base del funzionamento delle fibre ottiche vi è quindi la scelta degli indici di rifrazione per il core e per il cladding tali da non far avvenire il fenomeno della rifrazione. In particolare, si può operare una opportuna modifica di n_2 , proprio del mantello, in modo tale da rendere il cladding una discontinuità rispetto al core: a tal fine l'indice di rifrazione del corpo interno deve essere più elevato di quello esterno.

Le deviazioni indotte del segnale fanno sì che questo si rifletti sulle pareti della fibra ottica seguendone l'andamento, non necessariamente rettilineo.

A partire dalle suddette considerazioni è possibile introdurre i vantaggi principali dei sensori a fibra ottica⁸⁰ (FOS):

- Stabilità: in sintesi, i FOS non patiscono la corrosione e garantiscono un monitoraggio remoto dato che sono in grado di ridurre le perdite di trasmissione del segnale da un lato, trasmettendo su ampie lunghezze dall'altro;
- Non conduttività: non sono caratterizzati da rumori indesiderati dato che sono esenti da interferenze elettromagnetiche e di radiofrequenza;
- Convenienza: caratteristica dovuta alla capacità di integrazione permanente nelle strutture, resa possibile dalle loro dimensioni e dal loro peso.

⁷⁹ Wikipedia, *Legge di Snell*

⁸⁰ Pinet, E., Hamela, C., Glišić, B., Inaudib, D. and Mironc, N. Health monitoring with optical fiber sensors: from human body to civil structures. SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring 14th International Symposium. San Diego, California USA: 2, 2007

4.2.2 Sensori a fibra ottica (FOS)

Un sensore a fibra ottica altro non è che un dispositivo che sfrutta la fibra ottica in qualità di trasduttore oppure come mezzo di trasporto delle informazioni da un sensore remoto all'elettronica di elaborazione del segnale.

Andando ancor più nello specifico, è possibile utilizzare il segnale luminoso all'interno della fibra per la trasmissione di dati: questo avviene nel campo delle telecomunicazioni, secondo il suddetto principio di funzionamento, e può essere parimenti applicato al monitoraggio strutturale.

Tramite la tecnologia a fibra ottica si possono realizzare svariati sensori per l'indagine di altrettanti parametri strutturali. I sensori più diffusi sono quelli di strain (tensioni, carichi, spostamenti), accelerometri, distanziometri, inclinometri, pressurimetri, termometri. Come campo di applicazione, vengono impiegati nei sistemi di monitoraggio definiti contestualmente alla realizzazione del manufatto: in tal caso, il monitoraggio è sia strutturale che dei consumi energetici dell'edificio.

Data la complessità dell'oggetto, la classificazione dei sensori a fibra ottica può essere svolta in funzione di vari parametri.

La prima distinzione dei FOS si può stabilire in base alla posizione relativa sensore-fibra, distinguendo:

- Sensori intrinseci: l'elemento sensibile (indispensabile per la rilevazione della grandezza di interesse)⁸¹ è la fibra e viene impiegato un meccanismo di rilevamento o trasduzione appartenente alla fibra ottica;
- Sensori estrinseci: l'elemento sensibile è il trasduttore e la fibra è deputata al solo trasporto del segnale al dispositivo di rilevamento.

Una seconda ripartizione può essere teorizzata considerando il principio di funzionamento come elemento discriminante. In tal senso in precedenza è stato fissato il funzionamento generale delle fibre ottiche. Le categorie che possono essere distinte risultano:

- Sensori intensity-based
- Sensori spettrometrici
- Sensori interferometrici

I **sensori intensity-based** (IBS) sono così definiti in quanto la deformazione delle fibre ottiche lungo una qualunque porzione della loro estensione implica perdite di intensità della luce. In altri termini, l'intensità della luce viene modulata da un parametro esterno. Questa famiglia di sensori FOS può essere classificata in funzione dell'esistenza o meno del contatto fisico con il sensore.

⁸¹ Enckell M., Structural health monitoring using modern sensor technology: long-term monitoring of the New Årsta Railway Bridge, 2006

- Nel caso dei microbend sensors vi è contatto fisico e la modulazione dell'intensità della luce è basata sulle microcurvature indotte. Alla base vi è quindi la variazione di potenza trasmessa in relazione alla sollecitazione;
- I sensori noncontact displacement rappresentano l'altra tipologia di sensori intensity-based, in cui il contatto fisico con il sensore non sussiste. Sostanzialmente, sono caratterizzate da una fibra ottica che ha il compito di guidare il segnale trasmesso e da una o più fibre che fanno da collettore del segnale che viene riflesso dalle superfici limitrofe. Tali caratteristiche garantiscono indubbi vantaggi come la compatibilità con le fibre ottiche multimodali e la semplicità di realizzazione; però, le misurazioni risultano relative e in assenza di un sistema di riferimento si possono avere false letture.

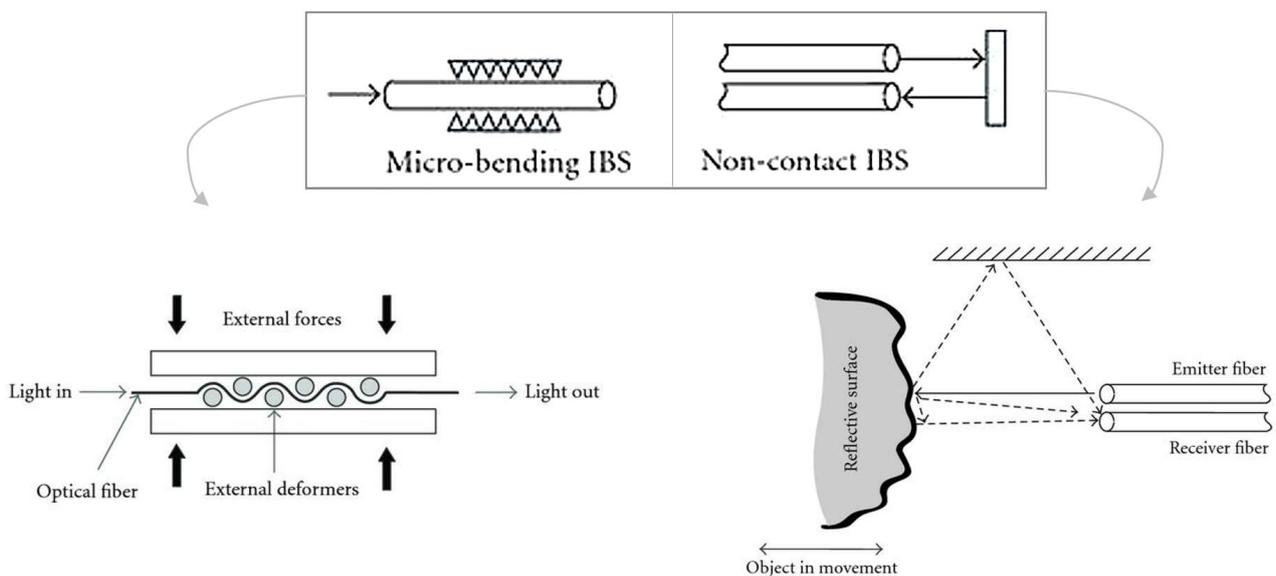


Figura 4.4. Schematizzazione dei sensori intensity-based⁸²

I **sensori spettrometrici** basano il rilevamento sulle variazioni di lunghezza d'onda della luce associate alla perturbazione fisica di interesse; i principali sensori di tale famiglia sono i reticoli di Bragg. Essi sono anche chiamati fibre ottiche a reticolo di Bragg, da cui l'acronimo FBG (fiber Bragg grating). I sensori a fibra ottica basati sulla tecnologia FBG consistono in porzioni di fibra in cui, per mezzo dell'esposizione a raggi UV, viene modificato l'indice di rifrazione del core, attuando la sua modulazione locale. Questo espediente permette di estrarre da un segnale una particolare frequenza. In sostanza, il reticolo svolge l'azione di filtro nei confronti del segnale che lo raggiunge: una specifica frequenza viene riflessa indietro (λ_b in figura) mentre il resto del segnale passa indisturbato. In aggiunta, la spaziatura del reticolo (p in figura) risulta proporzionale alla lunghezza d'onda della luce riflessa.

⁸² Yoany Rodríguez García, Jesús M. Corres, Javier Goicoechea, "Vibration Detection Using Optical Fiber Sensors", Journal of Sensors, vol. 2010, Article ID 936487, 12 pages, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/936487>

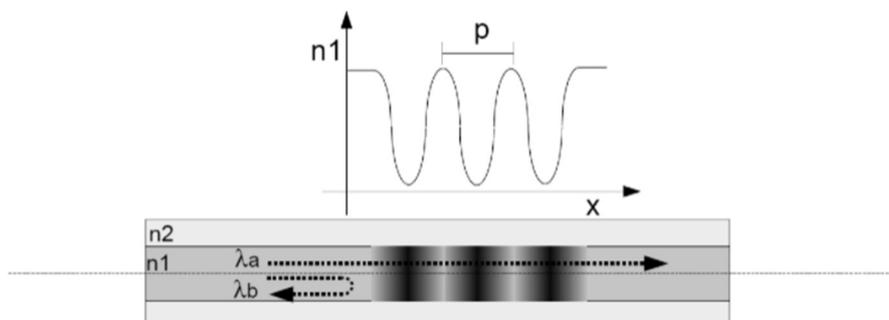


Figura 4.5. Sensore FBG⁸³ con 3 reticoli iscritti nella fibra

Passando al lato più pratico, quando la porzione di fibra con il reticolo di Bragg viene applicata alla struttura, la deformazione strutturale comporta la sua alterazione con conseguente modifica della frequenza del segnale riflesso. Dall'analisi del segnale riflesso è possibile ricavare entità e caratteristiche della deformazione. Infatti, il valore di deformazione misurato si ottiene per mezzo di conversione dei dati sulla spaziatura.

Infine, come vantaggio si sottolinea la possibilità d'impiego di tali sensori sia per monitoraggio statico che dinamico; mentre il punto debole è la sensibilità alla temperatura per cui si rende necessaria una compensazione termica.

I **sensori interferometrici** si basano sull'interferenza, un fenomeno dovuto alla sovrapposizione di campi di radiazione di sorgenti differenti o all'interazione tra diversi componenti del medesimo campo. La realizzazione di un sensore di tale tipo passa per la generazione di una modifica della fase ottica: la luce viene divisa in due fasci, di cui uno inviato tramite filo di misura e l'altro tramite un filo passivo. Una volta ricombinati, è possibile misurare le differenze di fase, correlate quindi a un valore fisico (in genere spostamenti o deformazioni).

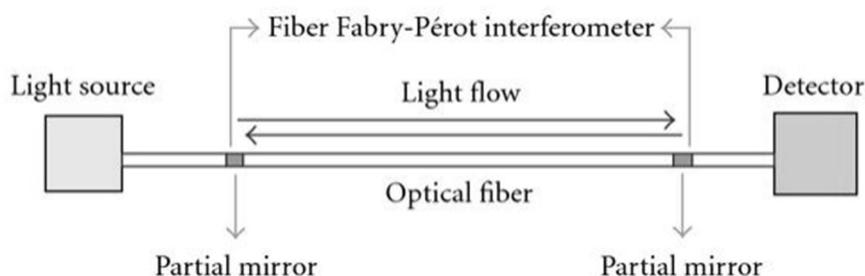


Figura 4.6. Struttura generale degli interferometri Fabry-Pérot

Il più diffuso sistema appartenente a tale famiglia è il cosiddetto SOFO.

⁸³ <http://www.opticalsensing.it/tecnologie-ottiche/sensori-in-fibra-ottica/>
Optical sensing technologies, Tecnologie ottiche: sensori in fibra ottica

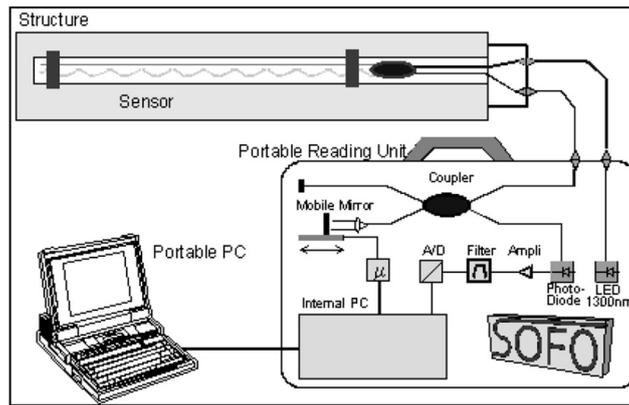


Figura 4.7. Componenti e funzionamento del sistema SOFO⁸⁴

4.2.3 Monitoraggio tramite sistemi a fibra ottica

Applicate inizialmente nel campo delle telecomunicazioni, le fibre ottiche vengono attualmente impiegate in svariati settori dell'ingegneria, tra cui il monitoraggio delle strutture.

Negli ultimi 25 anni si è passati dalla ricerca all'applicazione pratica dei sistemi a fibra ottica per il monitoraggio di strutture civili. Questi sono noti come *Optical Fiber Strain Monitoring System* (Sistema di monitoraggio delle deformazioni con sensori a fibre ottiche) oppure *Smart Fiber System* (Sistemi di fibre intelligenti) e sono essenzialmente composti da una serie ordinata di sensori a fibre ottiche che possono essere annegati nelle opere in calcestruzzo e materiali compositi o in corrispondenza di superfici di rivestimento di strutture in C.A. o acciaio. Lo Smart Fiber System si configura come un sistema nervoso delle strutture in grado di raccogliere ed elaborare i dati, fornendo informazioni immediate sullo stato di salute della struttura monitorata; gode della particolarità di consentire la rilevazione del carico di deformazione dall'interno ed è ottimale per il monitoraggio a lungo termine della struttura. Allo stesso tempo, si parla di *monitoraggio ottico*, dato che i sensori FOS che basano le rilevazioni su concetti di ottica ondulatoria e sulle proprietà della luce. Non avendo a che fare con le caratteristiche della corrente elettrica, vengono meno gli svantaggi delle attrezzature fondate sull'elettromagnetismo.

L'architettura di questi sistemi innovativi per il monitoraggio strutturale, costituita da un insieme di rilevatori associati alla fibra stessa, può essere meglio inquadrata con l'espressione di *sensori distribuiti in fibra ottica*. Alla base di questa tipologia di sistemi di monitoraggio vi è infatti l'impiego della fibra ottica come sensore distribuito di deformazione e temperatura. Il processo viene definito *multiplexing* o *multiplazione* e permette di realizzare una dorsale di misura con un solo cavo. Il "sistema nervoso" mappa lo stato tenso-deformativo della struttura in tempo reale, evidenziando eventuali criticità come fessurazioni, per mezzo di una singola fibra dallo sviluppo persino di decine di chilometri, in cui è come se fossero installati sensori

⁸⁴ Enckell M., Structural health monitoring using modern sensor technology: long-term monitoring of the New Årsta Railway Bridge, 2006

di deformazione a passo sub-metrico (uno ogni 20 centimetri circa) collegati ad un'unica centralina di misura a cui collegare un computer per l'elaborazione dei dati.

La possibilità di individuare anomalie strutturali, definendone la precisa collocazione, rende i sensori distribuiti in fibra uno strumento di diagnostica molto potente e con benefici notevoli in relazione alle strategie manutentive (gestione, pianificazione, sicurezza, economia).

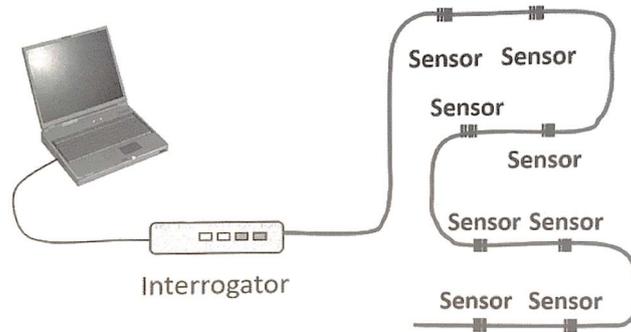


Figura 4.8. Architettura di un sistema di monitoraggio a fibra ottica: sensori distribuiti

Il sistema descritto non prescinde tuttavia dal posizionamento di sensori puntuali, che devono essere definiti nella configurazione per il monitoraggio. Si tratta di un numero sufficiente di punti di misura, composti da sensori di strain e un numero minimo di sensori termici – necessari per la compensazione termica. I sensori di strain vengono adoperati per la rilevazione delle deformazioni su tre direzioni ortogonali, mentre i sensori termici vengono impiegati anche per la verifica di possibili anomalie termiche. Nello specifico, sulla base della tipologia costruttiva e delle caratteristiche dell'opera, i punti di misura possono essere rappresentati anche da inclinometri per l'alzato, sensori nelle fondazioni annegati nel calcestruzzo (2 sensori: una coppia sensore strain-termico).

Il principio di funzionamento del sistema si basa sull'immissione di luce nella fibra e sull'osservazione dell'onda luminosa lungo il sistema distribuito, da cui correlare la deformazione della fibra alle variazioni a cui è soggetta la propagazione della luce nella fibra stessa. Per questo motivo si parla di sensori impiegati per la misura distribuita di deformazioni e temperatura sulle strutture. Il fenomeno fondamentale della tecnologia dei sistemi di misura distribuita in fibra ottica è lo scattering di Brillouin stimolato (SBS). Esso si verifica per mezzo dell'interazione tra onde luminose e un'onda acustica, rendendo la fibra ottica un sensore per tutta la sua lunghezza. Ai due capi opposti di una fibra monomodo si esegue l'immissione di due onde luminose: una è detta di *pump* (con frequenza ν_{pump}) e l'altra di *Stokes* o di *probe* (con frequenza ν_{probe}). Il risultato della sovrapposizione delle due onde in contropropagazione nella fibra è una variazione periodica dell'ampiezza massima dell'onda risultante (ad una frequenza pari alla differenza delle suddette due frequenze). A catena, ciò produce un'onda acustica, la quale modula l'indice di rifrazione. Partendo dal fatto che la diffrazione causa un trasferimento di potenza dall'onda di pump a quella di Stokes associato ad un rinforzo dell'onda acustica, è possibile misurare l'amplificazione dell'onda di probe variando la differenza di

frequenza (shift) tra le due onde luminose. Lo shift in frequenza di Brillouin ν_B (massimo della curva di guadagno dello SBS) dipende sia dalla temperatura che dalla deformazione, secondo una relazione lineare. Quindi, la misura dello shift di Brillouin permette di ricavare informazioni sulla temperatura e/o le deformazioni della fibra in esame; per distinguere le due grandezze è necessario usare due fibre in parallelo, di cui una solidale alla struttura per la deformazione e una non solidale per la temperatura.

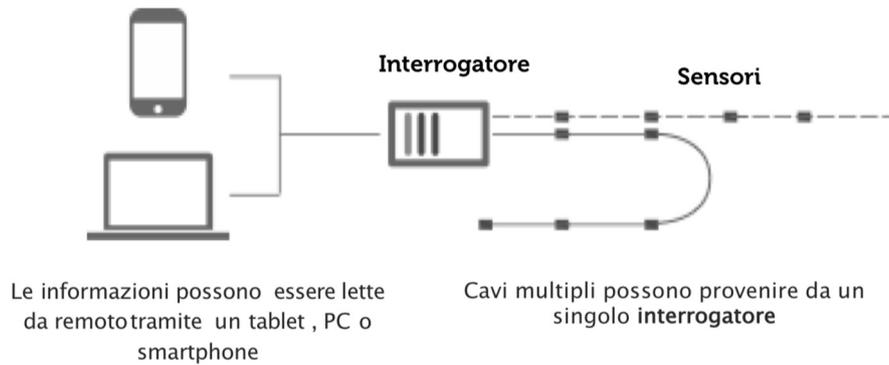


Figura 4.9. Multiplexing: decine di sensori leggibili in contemporanea sulla stessa fibra

Per quanto riguarda l'applicazione, il ricorso alle nuove strumentazioni a fibra ottica per il monitoraggio strutturale deriva dalle caratteristiche che risultano vantaggiose per tale ambito di applicazione; le peculiarità di un sistema di monitoraggio del tipo descritto sono numerose.

- Il primo aspetto da evidenziare è quello fisico: la fibra è di piccolo formato, oltre che leggera, e ciò consente di limitare le dimensioni del cablaggio rispetto ai sistemi tradizionali.
- Altro punto di forza fondamentale è rappresentato dalla possibilità di installare più sensori lungo la stessa fibra, in accordo al processo di *multiplexing*, con conseguente drastica riduzione dei costi associati, altro vantaggio del monitoraggio a fibra ottica.
- Inoltre, il sistema così concepito non necessita di alimentazione elettrica in corrispondenza del punto di acquisizione. A ciò si associa l'attitudine del cavo all'installazione in condizioni speciali e impensabili per i sistemi tradizionali, come ambienti acquatici o a rischio esplosione, dato che non viene trasportata corrente elettrica.
- La fibra ottica è resistente alle alte temperature ed alla corrosione ed è immune alle interferenze elettromagnetiche. Essa si presta all'integrazione all'elemento da monitorare, potendo essere annegata in qualsivoglia materiale (soluzione *embedded*). Si pensi, ad es., all'impiego all'interno del calcestruzzo: in questo modo il sistema diventa un tutt'uno con l'elemento. Ciò si traduce in sensori non invasivi e non distruttivi.
- In aggiunta, il sistema presenta elevata precisione, facilità d'installazione e affidabilità nel lungo periodo, consente il controllo contemporaneo di un elevato numero di punti di misura.

La validità delle tecniche a fibra ottica per il monitoraggio delle strutture trova conferma anche nei recentissimi casi applicativi di sistemi di monitoraggio e nelle tecnologie in tal ambito appena brevettate. Si tratta di sistemi di fibre con sensori inseriti direttamente nel materiale durante la lavorazione o applicati all'esterno tramite resine, finalizzati alla misura diretta di deformazioni e temperatura di un oggetto di forma e materiale generici e al calcolo indiretto di tensione, accelerazione, inclinazione, curvatura, corrente, spostamento, compressione, trazione, torsione. Il mercato offre una tecnologia innovativa applicabile in diversi contesti legati all'ambito delle costruzioni che vanno dal monitoring geologico a ferrovie, edifici, ponti, gallerie, stadi, rendendo i sistemi di monitoraggio strutturale mediante fibra ottica una tecnologia in rapida diffusione.

4.3 La tecnologia BIM per il monitoraggio strutturale

Una delle questioni principali da considerare all'atto di implementare un sistema di monitoraggio consiste nella gestione efficace dell'enorme flusso di dati associati al sistema, sia grezzi che post processati, che possono persino superare le centinaia di Gigabyte⁸⁵. La gestione ottimale delle informazioni diventa, quindi, un compito significativo che richiede strumenti appropriati per poter essere affrontato. Gli approcci tradizionali non sono sufficienti per trattare e gestire in modo efficiente la grande quantità di dati associata al monitoraggio strutturale e condurre un processo decisionale sistematico per la manutenzione futura.

L'impiego del BIM nei sistemi di monitoraggio rappresenta un modo concreto per risolvere le loro questioni di trattamento dati. L'integrazione delle informazioni relative al monitoraggio nei modelli BIM aiuta la categorizzazione, la documentazione e l'aggiornamento dei dati del monitoraggio lungo l'intero ciclo di vita della struttura. Rendere il BIM dinamico registrando e aggiornando le informazioni dello SHM è di notevole ausilio per il professionista incaricato di valutare la salute delle varie parti della struttura nel tempo.

4.3.1 Descrizione della metodologia BIM

Il *Building Information Modeling* (BIM) si pone come un promettente ambiente di calcolo e una piattaforma di rappresentazione digitale integrata per lo SHM in grado di organizzare e visualizzare una notevole quantità di dati dei sensori e successive informazioni sulla salute strutturale per un periodo prolungato, tramite inventario automatizzato.

Il BIM rappresenta uno strumento efficace per la riduzione dei costi e dei tempi di realizzazione dei progetti, aumentandone produttività e qualità. Tipicamente ogni progetto è corredato da centinaia di documenti, il cui collegamento richiede un grande sforzo umano. La

⁸⁵ Mojtaba Valinejadshoubi, Ashutosh Bagchi, and Osama Moselhi, *Managing Structural Health Monitoring Data Using Building Information Modelling* Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Montreal, Canada

tecnologia BIM garantisce una coordinazione e comunicazione efficaci tra le discipline di progetto e sul campo, alterando significativamente la modalità di gestione delle informazioni inerenti all'opera nel settore delle costruzioni e abbattendo le barriere tramite la condivisione di conoscenze lungo l'intera vita del manufatto. Il progetto BIM è costruito digitalmente in forma di database nella piattaforma BIM. La modellazione digitale consente di non dover visionare disegni, programmi e schede tecniche separati tra loro per informarsi su un particolare elemento, dato che tutta l'informazione è costruita in un *oggetto* intelligente nel modello BIM, un contenitore di informazioni dettagliate.

L'innovazione in tal senso assume le vesti della digitalizzazione, la quale è oggi in grado di sviluppare sistemi tecnologici avanzati basati su automazione e impiego di sensori. La piattaforma BIM è il luogo in cui tale integrazione trova applicazione; essa porta con sé il grande vantaggio di semplificare la gestione della complessità dei processi costruttivi con una generale maggiore efficienza e ha come obiettivo la creazione di un sistema interoperabile e interattivo globale di condivisione delle informazioni tra i diversi attori del settore. In aggiunta, l'integrazione del monitoraggio strutturale all'impiego delle informazioni raccolte durante l'intero ciclo di vita dell'opera costituisce un importante supporto decisionale in ambito di manutenzione.



Figura 4.10. Metodologia BIM nel ciclo di vita strutturale⁸⁶

Il BIM è riconosciuto come lo strumento informativo centrale del processo di digitalizzazione nel comparto delle costruzioni (più propriamente, *AEC industry*); questo ruolo gli viene riconosciuto costituendo un potente *tool* per la gestione dei dati in termini di acquisizione, ordinamento, salvataggio, condivisione e richiamo, il tutto fornito in un ambiente digitale. Il grande vantaggio di implementare processi BIM, lavorando secondo questa metodologia, sta proprio nell'abilità di gestire la grande mole di dati contenuti in un progetto. I modelli, infatti, non sono mere rappresentazioni grafiche bensì costituiscono un database con tutte le informazioni

⁸⁶ <https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-dati-cresme-architetti-progettazione-bandi-gara/>

necessarie per lo sviluppo del progetto: costruzione e gestione del ciclo di vita dell'opera. L'intero processo viene così integrato in modo tale che i professionisti coinvolti siano in grado di lavorare con una migliore comunicazione, minimizzando la perdita di informazioni. Ciascuna parte interessata ha accesso immediato agli aggiornamenti degli altri utenti poiché ogni informazione è contenuta in un unico ambiente di condivisione dati, il Common Data Environment (CDE). Il CDE è la fonte di informazione condivisa dall'intero team del progetto ed è impiegato per collezionare e gestire i dati sia grafici che non grafici⁸⁷.

Infatti, la rappresentazione diventa parametrizzata. I *parametri di progetto* sono il mezzo tramite il quale è possibile, secondo la filosofia BIM, specificare le informazioni relative a tutti i diversi aspetti che si vogliono sviluppare, il tutto in un singolo modello. Questo successo è garantito dai parametri. Nello specifico, i parametri possono essere identificati come aggettivi che caratterizzano il progetto, rendendolo riconoscibile, elemento per elemento, nel programma di esportazione. È possibile creare differenti insiemi di parametri condivisi: ad esempio, si può pensare di distinguere i parametri relativi alla manutenzione da quelli riferiti alla gestione generale del progetto (costi, tempi, analisi tecniche, ecc.). I parametri condivisi sono poi da trasformare in effettivi parametri di progetto. I modelli digitali 3D costituiscono la base per le successive estensioni e possono essere sviluppati a differenti livelli (LOD) in base alla fase di progettazione considerata (preliminare, di dettaglio, ecc.). aggiungendo agli oggetti le informazioni sui tempi della fase costruttiva (Modello 4D), è possibile eseguire il processo di pianificazione della costruzione e aggiungendo le informazioni sui costi (Modello 5D) è possibile svolgere l'analisi dei costi di costruzione e dei flussi monetari in funzione dell'avanzamento dei lavori. Anche le procedure di gestione del manufatto (facility management) possono essere implementate sul modello arricchito delle informazioni attinenti (Modelli 6D) e possono essere condotte valutazioni di sostenibilità sui modelli successivamente sviluppati (Modelli 7D). Tutti i modelli possono essere sviluppati in fase di progetto e aggiornati durante l'esecuzione e l'esercizio, per far fronte ai dati dal campo.

4.3.2 Implementazione BIM-based del sistema di monitoraggio

Il seguente paragrafo analizza l'integrazione delle due procedure, BIM e SHM, con particolare riferimento agli approcci che si propongono di risolvere tale rapporto, in vista del caso studio che verrà trattato.

Ad oggi è possibile realizzare la connessione, l'archiviazione e l'aggiornamento dei dati dal monitoraggio strutturale all'interno dell'ambiente di lavoro BIM tramite la creazione di interfacce personalizzate, sebbene tale processo sia altamente piattaforma-dipendente. Così facendo,

⁸⁷ Becerik-Gerber B., F. Jazizadeh, N. Li, and Calis G., 2012, Application areas and data requirements for BIM-Enabled facilities management, *J. Constr. Eng. Manage.*, 138(3): 431-442.

il classico modello BIM statico, ossia archivio digitale di tutti i dati dell'opera *as-built*, evolve ad una modalità dinamica. Un modello geometrico parametrizzato tridimensionale si configura come un supporto fondamentale per il monitoraggio strutturale e per la manutenzione di manufatti complessi. Sulla base di quanto espresso, infatti, la metodologia BIM permette di strutturare un supporto grafico ma anche informativo e gestionale; il suo ricorso risponde agli obiettivi dettati dalle “*Linee guida per il monitoraggio strutturale*” (suddetta UNI/TR 11634), ossia modello numerico della struttura, sistema di raccolta e gestione dati, procedure di elaborazione dati e decisionali.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei due processi, essi sono sinteticamente descritti nel diagramma di flusso di Fig.11, in cui vengono descritte le connessioni tra gli stessi⁸⁸.

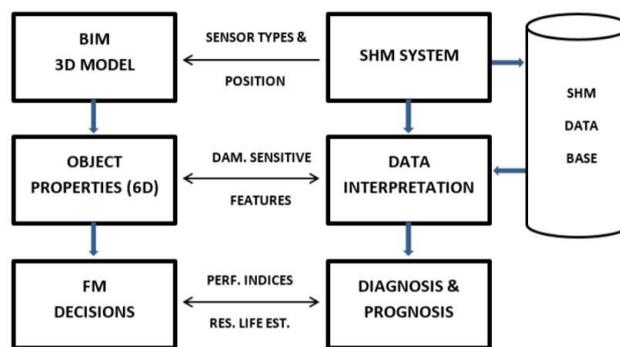


Figura 4.11. Impiego del BIM nel processo SHM: rappresentazione BIM-based del sistema di monitoraggio

Come indicato da tale diagramma, la costruzione del modello 3D dinamico deve garantire l’inserimento dei tipi di sensore e delle loro posizioni, eventualmente fornendo accesso al database dello SHM per fornire una rappresentazione interattiva delle misurazioni; anche tra gli altri moduli di processamento dovrebbe essere fornita l’interazione tra i due processi.

La rappresentazione dei sensori è già stata trattata in letteratura (Sternal et al., 2016); le questioni principali sono legate ai formati standard da usare per l’interscambio di dati e alle funzioni da implementare nella piattaforma di comunicazione e archiviazione dei dati.

L’attuale workflow per la rappresentazione del sistema SHM consente la creazione di un’interfaccia tra SHM e BIM, risolvendo la questione relativa alla rappresentazione del sistema SHM e creando una connessione del flusso di dati di tipo bidirezionale; grazie ad esso, è possibile creare il sistema di sensori (una catena di accelerometri) nella piattaforma BIM (ad es., Revit) e associare ad essa le informazioni provenienti dalle misure sul campo. Per il momento non c’è un workflow preferenziale per informare e ampliare il modello BIM con lo SHM e/o dati interpretati riguardanti gli elementi del progetto. L’assenza di un’unica comune interfaccia standard per la descrizione dei componenti della struttura e la mancanza di criteri per l’inclusione dei dati del monitoraggio sono le ragioni principali alla base di tale situazione.

⁸⁸ Del Grosso, Andrea & Basso, Paolo & Ruffini, Lorenzo & Figini, Fabio & Cademartori, Marcello. (2017). *Infrastructure management integrating SHM and BIM procedures*.

Il trattamento efficiente delle informazioni del monitoraggio strutturale per mezzo dell'integrazione dei dati raccolti in un tool di gestione dei dati come il BIM presenta numerosi vantaggi. Il primo e più tangibile è rappresentato dalla creazione di un modello unico, di tipo digitale che può essere usato in modo valido ogni volta che sia necessario.

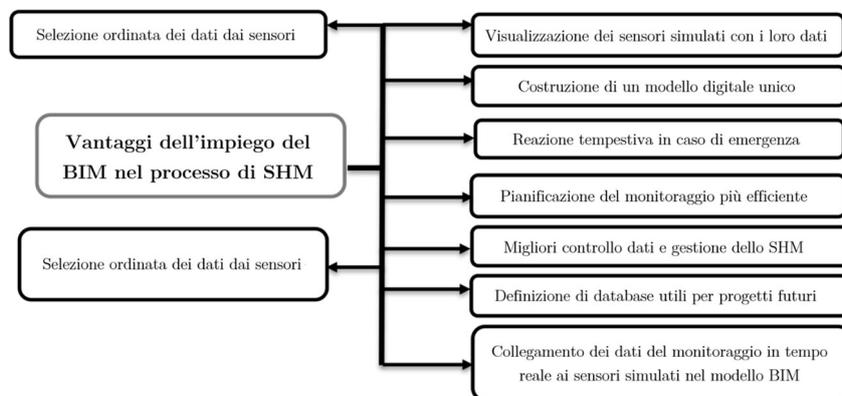


Figura 4.12. Vantaggi dell'impiego del BIM nel processo di SHM

Per ciò che concerne la metodologia con cui si garantisce l'integrazione dello SHM al processo BIM, essa viene riassunta dal grafico di Fig.12 che riporta le fasi principali per l'estensione del modello BIM statico a modello dinamico. L'aspetto centrale della modellazione consiste nella possibilità di creare dei sensori simulati, modellazione dei sensori reali, visualizzabili nei componenti della struttura; il carattere dinamico del modello deriva dal collegamento dei dati dei sensori reali ai sensori simulati, il cui scambio di informazioni avviene tramite l'impiego di file di modello basati sullo standard IFC. In particolare, tale standard, tipicamente adottato per archiviazione e scambio dell'informazione del modello BIM, non consente la modellazione di un sistema di monitoraggio completo contenente le informazioni su sensori e strategie di monitoraggio. L'attuale standard IFC (IFC 4) fornisce gli strumenti per modellare taluni tipi di sensore ma ha dei limiti (ad es., per la comunicazione wireless tra sensori con algoritmi incorporati); quindi, gli standard devono essere estesi tramite modelli concettuali in grado di rappresentare specificamente le informazioni relative al monitoraggio⁸⁹. Il modello ottenuto è in grado di aiutare i professionisti a visualizzare la posizione dei sensori e a gestire i dati dei sensori più facilmente. Complessivamente, il seguente metodo consente di collegare i dati esterni reali ai sensori creati nel modello BIM.

⁸⁹ Sternal M., and Dragos M., 2016, BIM-Based modeling of structural health monitoring systems using the IFC standard, *Proceedings of the 28th Forum Bauinformatik, Hanover, Germany*.

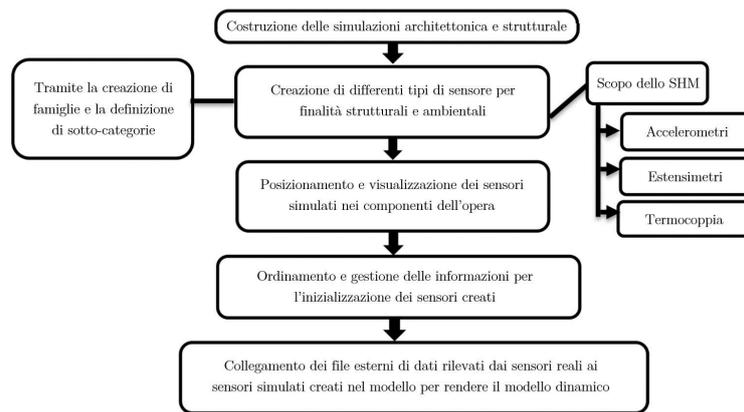


Figura 4.13. Gerarchia delle fasi del metodo di integrazione

Il modello BIM è reso dinamico dalla possibilità di creare e visualizzare le informazioni dei sensori installati sulla struttura ma anche dalla capacità di gestire in tempo reale i dati dei sensori e aggiornarne le informazioni (ad es., attivazione/spegnimento da remoto dei canali di acquisizione). Il tutto viene garantito dal collegamento attivo - e non passivo - alle risorse esterne.

Come ulteriore step, è possibile collegare il modello BIM contenente le informazioni dei sensori al programma di identificazione dinamica per l'analisi strutturale in modo tale da interpretare i dati dei sensori. In aggiunta, l'integrazione delle due tecnologie può riguardare anche l'identificazione del danno e la valutazione dello stato di salute della struttura per mezzo dei dati in tempo reale.

All'atto pratico, la simulazione tramite BIM del sistema di monitoraggio basato su sensori consente la visualizzazione di tutti i componenti della catena di misura (come i diversi tipi di sensore) e la classificazione ordinata dei dati del monitoraggio aggiornati, con conseguente facilitazione delle fasi di interpretazione dei dati e di identificazione di variazioni di condizione strutturale; complessivamente, questa proprietà del BIM implica una maggiore efficienza delle procedure decisionali, del change management e della valutazione continua della prestazione strutturale.

Infine, si può concludere che il concetto di potenziale relazione tra SHM e BIM è stato ancora poco investigato. Da un lato la crescente disponibilità di procedure estremamente generali per l'accesso dei dati nei database BIM suggerisce che l'integrazione dei dati SHM nel flusso di informazioni relative al progetto sia solo questione di tempo; dall'altro lato lo scenario frammentato degli ambienti di lavoro e l'eterogeneità nei formati dei file in funzione della scala del progetto pone dei dubbi riguardo all'attuabilità dell'approccio in termini di interoperabilità.

Ulteriori sviluppi si rendono necessari per mitigare le problematiche citate e per consentire all'intero processo diagnostico/prognostico di essere espresso sino alla scala di sistema.

A questo punto la definizione di DT ha più senso:

un Digital Twin è una simulazione integrata multifisica, multiscala e probabilistica di un sistema *as-built* che sfrutta i migliori modelli fisici disponibili e i dati aggiornati dei sensori (in tal caso riferiti allo SHM) per riflettere la vita del corrispondente gemello reale.

È un'entità modulare contenente tre parti: prodotto fisico, prodotto virtuale e interconnessione di dati tra i due prodotti. I flussi di dati tra un oggetto fisico esistente e un oggetto gemello digitale sono totalmente integrati in ambo le direzioni. L'oggetto digitale è in grado di agire come istanza di controllo dell'oggetto fisico; un cambio nello stato dell'oggetto fisico (intrinseco o dovuto ad altri oggetti, fisici o digitali) comporta una variazione dello stato dell'oggetto digitale, e viceversa.

In questa ottica, il BIM è la fonte di dati chiave per l'implementazione di un DT.

La predisposizione di un DT della struttura monitorata influenza l'architettura del sistema di monitoraggio, la quale deve corredarsi di una piattaforma Cloud per la raccolta dei dati interfacciata con un applicativo server che, sfruttando i principi di Machine Learning e Big Data, consente l'analisi e l'interpretazione dei dati visualizzati sul DT.

Quindi, i 3 componenti che trasformano un sistema di monitoraggio da normale a intelligente sono: hardware (legato ai sensori per i dati grezzi), software (per l'estrazione delle informazioni dall'hardware, apprendere da esse grazie ad algoritmi e prevedere lo stato della struttura) e network (connessione dei dispositivi tra loro e con i componenti AI). Essi consentono di monitorare la situazione strutturale, avendo un certo controllo sull'evoluzione della struttura, con la capacità *smart* di effettuare autodiagnosi.

Infine, con il DT è possibile parlare di monitoraggio intelligente dato che la creazione, calibrazione e visualizzazione cloud-based di un sofisticato gemello digitale 3D dell'opera che acquisisce continuamente dati dalla struttura reale (spostamenti, deformazioni, ecc.) garantisce la corrispondenza iterativa del modello virtuale.⁹⁰ Quest'ultimo, grazie all'intelligenza artificiale, impara e progredisce, sino a consentire l'analisi predittiva del comportamento futuro della struttura.

⁹⁰ Andrea Nardinocchi, Direttore Tecnico Italferr S.p.A. (Gruppo FS Italiane) – Francesco Folino, BIM Coordinator: *Il Gemello Digitale a supporto del monitoraggio delle infrastrutture attraverso l'uso del BIM e dei sensori IOT* – articolo pubblicato su InGenio Web

Capitolo 5

La tipologia costruttiva dello stadio

La seguente parte della trattazione riguarda lo studio del sistema di monitoraggio dello stadio Olimpico Grande Torino, comprese pianificazione e gestione. Dato che questo dipende fortemente dalle caratteristiche dell'opera monitorata, in prima battuta si approfondisce lo stadio come tipologia costruttiva, da cui si denoterà l'importanza di manutenzione e monitoraggio. La tipologia costruttiva è fortemente influenzata dagli eventi storici che segnano l'evoluzione delle strutture e, anche per questo, pone l'attenzione sul ruolo del monitoraggio strutturale.

La tematica viene specializzata al caso studio, lo stadio Olimpico di Torino.

5.1 Cornice storica

L'analisi della storia in cui si inquadra lo sviluppo dello stadio come tipologia costruttiva è importante per conoscere e comprendere la configurazione attuale e il percorso che ha consentito di giungere ad essa.

Parecchi tra i principali stadi di calcio italiani sono di epoca fascista e nel corso del tempo sono stati soggetti a interventi di ristrutturazione, i quali hanno riguardato, in modo particolare, l'integrazione della struttura di copertura. Il processo analogo che il tempo ha riservato loro, fatto di variazioni strutturali significative, nonché l'età avanzata in relazione alla rilevanza della costruzione, sottolineano la necessità di monitoraggio strutturale nei confronti di questi speciali componenti del patrimonio esistente.

La storia degli stadi ha inizio sul finire dell'Ottocento, quando il *foot-ball* sbarca in Italia dall'Inghilterra. Le grandi spianate delle piazze d'armi erano il teatro di gioco, il cui ridotto pubblico si disponeva attorno al campo, spesso portando la sedia da casa. Per la finale del

primo campionato italiano, l'8 maggio 1898 a Torino, 153 spettatori assistettero su una rudimentale tribuna in legno.

Già negli anni Dieci il calcio non è più solo un divertimento da dopolavoro: sorgono impianti con capienza pari a 4000-5000 persone, vagamente somiglianti a stadi. Questa prima generazione di stadi fu progettata secondo i criteri di un grande vaso corredato da tribune semplici e servizi minimi essenziali per l'esercizio. I campi sportivi continuano a poggiare sulle rovine di vecchie piazze d'armi, in origine destinate alle esercitazioni militari e unico spazio offerto dalla città del '900. È il caso di Genova e Torino; in quest'ultima lo spiazzo militare era situato tra i corsi Galileo Ferraris e Umberto I (oggi Duca degli Abruzzi).

Imitando la Germania di Hitler, il dittatore Mussolini decise che gli sport fossero parte integrante del governo; in questo modo lo sport nell'Italia fascista divenne molto importante. Alla metà degli anni Venti il regime fascista comprese il valore propagandistico ed educativo che lo sport potesse avere; il calcio rappresentava ormai un fenomeno di massa. È stato stimato che tra il 1927 e il 1929 i campi realizzati dai comuni furono 2400: qualcosa come il 15% della spesa in opere pubbliche, strategico anche per mitigare la crisi dovuta alla rivalutazione della lira. La celebrazione della forza del regime di Mussolini passava attraverso le grandi opere; così, sul finire degli anni Venti, lo sforzo edilizio fascista dagli impianti di base si trasferì alle grandi arene. La prosperità costruttiva del regime fascista interessò anche gli stadi, costruiti come monumenti di gloria segno di dominio del regime e della volontà di lavorare e realizzare il potere. Il primo stadio italiano sotto il regime è stato edificato a Bologna da Leandro Arpinati. Tra il '26 e il '34 vengono costruiti gli altri primi stadi: lo stadio del PNF e quello di Testaccio a Roma, il San Siro a Milano, il Filadelfia e il Comunale a Torino. Questa seconda generazione di stadi, essendo costruiti sotto Mussolini, presentavano i tratti dell'architettura romana antica; in aggiunta alle strutture precedenti, prevede, internamente o esternamente allo stadio, piste di atletica e altre strutture sportive, ma anche la copertura per la tribuna riservata a vip e autorità. Il ventennio fascista è quindi stato un periodo fondamentale, in cui sono sorti molti impianti storici monumentali più belli e ancora funzionanti.

La caduta del fascismo segna la fine dell'attuazione di un progetto sistematico sugli stadi da parte di politica ed edilizia. A partire dal dopoguerra vennero svolti interventi indipendenti tra loro, senza una chiara visione bensì in diverse direzioni, a testimonianza della poca attenzione verso le infrastrutture e la valorizzazione del patrimonio esistente.

Questi interventi di riqualificazione a cui la maggior parte degli stadi esistenti è stata sottoposta nel corso del tempo sono stati spesso eseguiti in concomitanza ad eventi sportivi internazionali e per l'adeguamento ai moderni standard. Tali interventi in genere riguardano:

- eliminazione della pista di atletica;
- aumento capienza (ordine di grandezza di 10 mila spettatori);

- avvicinamento delle gradinate al terreno di gioco per mezzo della trasformazione dello spazio ovale in una pianta principale di tipo rettangolare;
- miglioramento dell'accessibilità;
- adeguamento della struttura alle normative tecniche contemporanee;
- adeguamento degli impianti agli standard moderni;
- creazione di nuovi spazi interni destinati ad uso extra-sportivo;
- realizzazione della copertura.

Gli interventi in questione vengono generalmente pianificati in modo da garantire lo svolgimento delle partite con pubblico durante i lavori.

Tra questi, le azioni principali frequenti, che identificano la prassi per gli stadi esistenti, riguardano l'integrazione successiva della copertura e l'adeguamento degli stadi a pianta ovale allo schema rettangolare, di maggiore fruizione.

In relazione all'adeguamento allo schema rettangolare, si tratta della conversione della pista di atletica in spalti, che consente di avviare alla pianta ovale tipica degli stadi sorti tra anni '30 e '60. L'abbassamento della quota del terreno di gioco consente di ricavare lo spazio utile al prolungamento delle tribune verso il basso. Il primo anello viene ricostruito rettilineo e parallelo al campo, mentre i successivi anelli rimangono praticamente inalterati e su di essi si va ad innestare la copertura di successiva concezione.

Infine, al fine di dare un impatto iconico moderni, si decide talvolta di avvolgere l'intero manufatto con un guscio in membrana e pannelli d'acciaio.

Nel complesso si tratta di un progetto di ristrutturazione e conservazione che si appoggia all'opera esistente, sfruttandone alcune parti a proprio favore, con l'obiettivo di far coesistere necessità funzionali e logiche strutturali.

Tutti i tratti evidenziati in questo paragrafo trovano una pratica applicazione se si analizza la storia dello *stadio Olimpico Grande Torino*.

Era il 14 maggio 1933 quando a Torino veniva inaugurato lo *stadio Mussolini*, infine rinominato *stadio Olimpico Grande Torino*, costruito in 188 giorni in modo da essere pronto ad ospitare il campionato del mondo 1934, in qualità di stadio più imponente del Paese (capienza: 65.000 posti).



Figura 5.1. L'architettura razionale dello stadio Olimpico Grande Torino

Classico esempio di architettura di stile razionale, l'impianto nasce come *Stadio municipale Benito Mussolini* (1933-1945), in sostituzione dei precedenti impianti sportivi della Piazza d'Armi, dove appunto sorge, nel quartiere torinese di Santa Rita.

Al fine di snellire i tempi per la realizzazione dell'opera, venne bandito dall'amministrazione civica un appalto-concorso nazionale per l'edificazione dell'impianto (delibera del 5 giugno 1932). Lo stadio, nelle componenti fondamentali di tribune, gradinate e locali interni, viene progettato dall'arch. Raffaello Fagnoni e dagli ingg. Enrico Bianchini e Dagoberto Ortensi. Il loro progetto, l'originario, rendeva lo stadio il più capiente d'Italia con 65 mila posti.

I lavori di costruzione si protrassero dal 21 settembre 1932 fino a fine aprile del '33; il 14 maggio avvenne l'inaugurazione presieduta dal segretario del PNF, Achille Starace. Dopo gli eventi inaugurali, fu teatro di diversi incontri dei mondiali italiani del '34.



Figura 5.2. Lo stadio municipale Benito Mussolini (Visuale aerea dello stadio, allora in aperta campagna; effetti prodotti dai bombardamenti dell'incursione aerea del 17 agosto 1943)

La caduta del fascismo nel secondo dopoguerra segna la perdita dell'originaria denominazione al duce: il manufatto assume la denominazione di *Stadio comunale* (1945-1986). In tale periodo, ospita al suo interno il Centro di medicina per lo sport.

In seguito, nel 1986 lo stadio viene intitolato a Vittorio Pozzo: *Stadio Comunale Vittorio Pozzo* (1986-2005). È possibile affermare che negli anni '80 l'impianto era diventato obsoleto, in quanto piccolo e non versatile; tuttavia, la sua struttura risultava sicura. In tal contesto, nello stesso 1986 si decise per l'erezione di un nuovo stadio, lo stadio delle Alpi, scartando l'ipotesi di ristrutturazione e demolizione/nuova costruzione. In pratica, in questo modo quello che sarebbe diventato lo Stadio Olimpico 'va in pensione': viene impiegato sempre meno, a favore del più giovane Delle Alpi, subisce gli effetti di abbandono e degrado causato da assente manutenzione.



Figura 5.3. Lo stadio comunale Vittorio Pozzo

Dopo varie proposte, progetti (da parte del CONI, della Juventus), tutti rinunciati, la svolta che segna l'inizio della terza vita arriva nel 2001: lo stadio viene designato come impianto per i giochi olimpici invernali di Torino 2006. Ha inizio una importante attività di ristrutturazione, che dura dal 2003 al 2005. Tale progetto venne affidato agli studi di architettura Giovanni Cenna Architetto e Arteco ed è stato incentrato sulla conservazione delle strutture esistenti, tuttora chiaramente visibili, e ha previsto l'aggiunta di una copertura completa e di un terzo anello di gradinate. I posti sono diventati tutti a sedere e rispettosi delle attuali norme di sicurezza, arrivando a 27.168 unità. Il costo della ristrutturazione è stato di 48 milioni di euro. La presentazione del nuovo impianto è avvenuta il 29 novembre 2005, occasione in cui è stato ribattezzato in *Stadio Olimpico* (2005-2016). Dopo aver ospitato le cerimonie delle Olimpiadi, è tornato ad ospitare il Torino e la Juventus. La presenza della pista di atletica in primis rendeva lo stadio poco adatto al calcio, a causa della distanza spalti-terreno di gioco. Per questo motivo, nell'estate 2008, si è deciso di creare un nuovo anello in corrispondenza della vecchia pista, ampliando i posti di 1350 unità. In tale direzione di ampliamento dei posti disponibili sono stati svolti anche i lavori successivi svolti in differenti tranches, sino al raggiungimento degli attuali 28.177 posti.

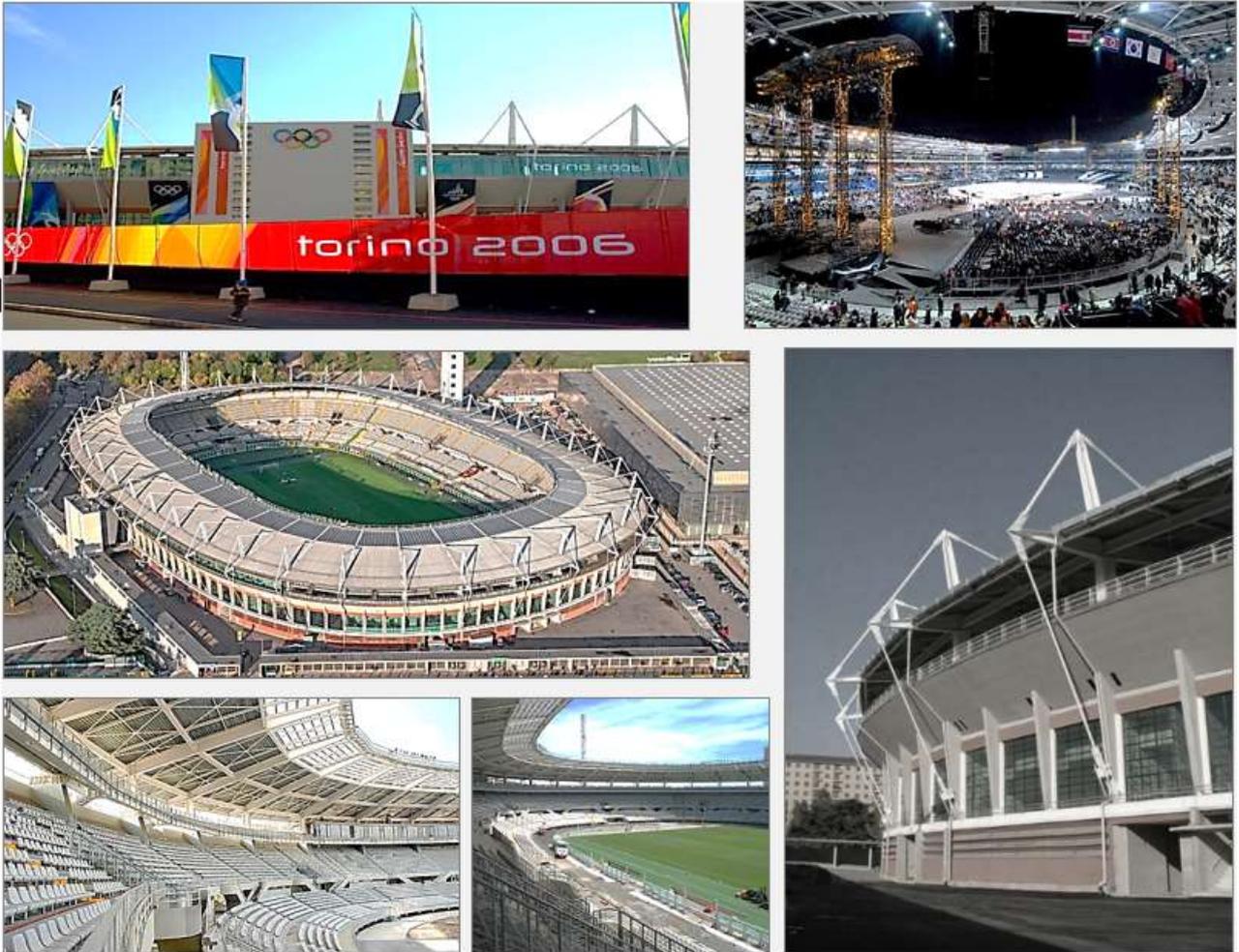


Figura 5.4. Lo stadio Olimpico

Dall'estate 2011, avendo la Juventus inaugurato uno stadio di sua proprietà, l'Olimpico è diventato d'uso esclusivo del Torino. Infine, nell'aprile 2006 è avvenuta la ridenominazione ufficiale dell'impianto alla memoria del Grande Torino, così oggi il manufatto è conosciuto come *Stadio Olimpico Grande Torino*.

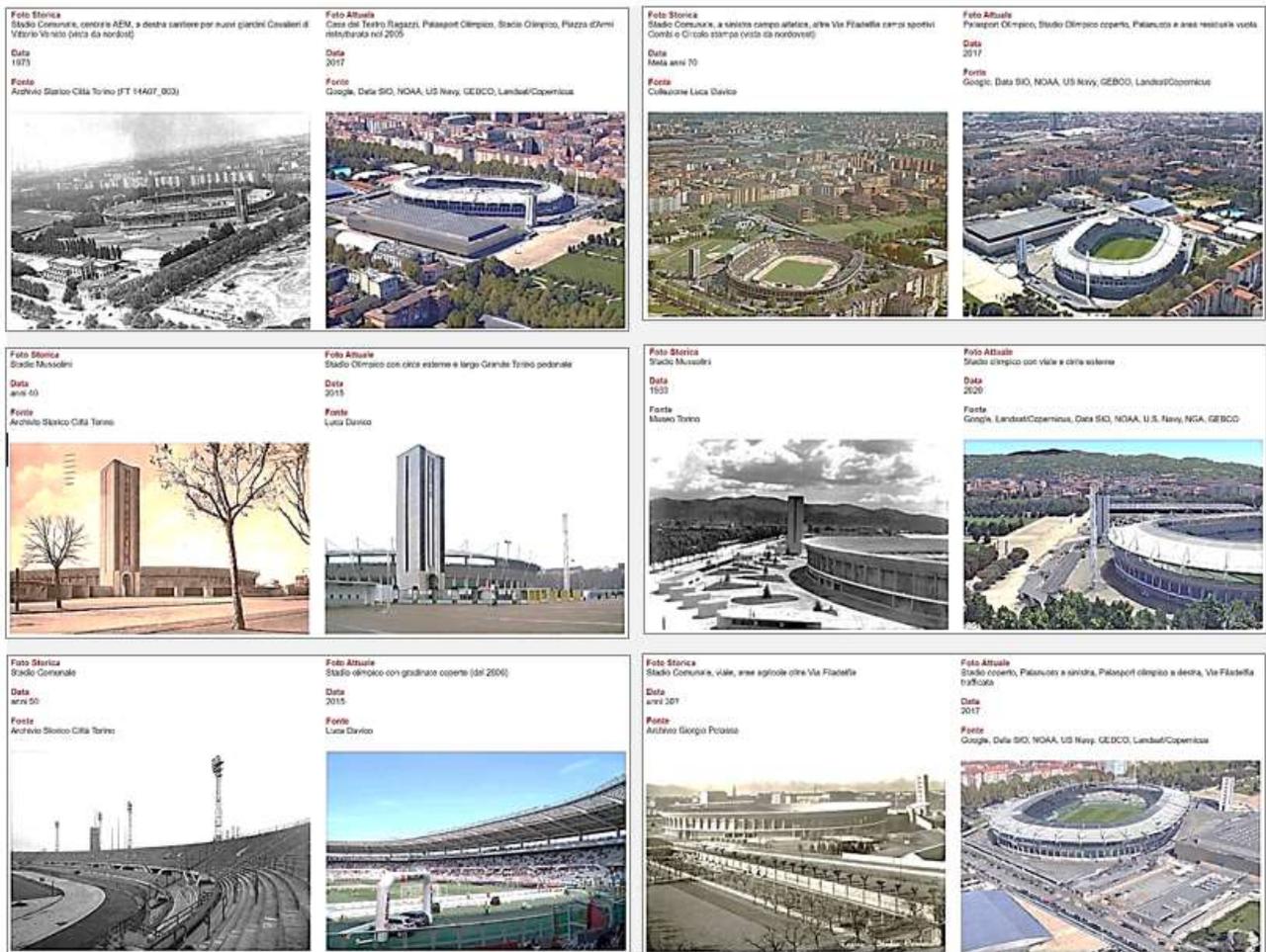


Figura 5.5. Com'era e com'è: lo stadio Olimpico Grande Torino

Una volta inquadrata tale cornice, si intuisce facilmente quanto possa essere importante e notevolmente significativo il ruolo del monitoraggio strutturale in questo contesto.

5.2 Lo stadio come struttura speciale

Il paragrafo seguente si pone l'obiettivo di descrivere le caratteristiche della tipologia costruttiva in esame, esaminando gli aspetti comuni salienti che contraddistinguono la configurazione tipo di tale struttura speciale. Si fa in particolare riferimento alla categoria esaminata in questa trattazione, ossia stadi nati in epoca remota in calcestruzzo armato e soggetti a interventi successivi, che hanno riguardato in maniera primaria l'integrazione della copertura.

Avendo a che fare con gli stadi, si parla di strutture speciali fondamentalmente sia per i caratteri propri di un impianto di tale tipo, non assimilabili ad altre tipologie costruttive, sia per l'utilizzo associato ad un'ampia utenza che interagisce dinamicamente con l'organismo costruttivo.

Gli stadi rientrano infatti in *Classe d'uso 3*: strutture civili rilevanti il cui uso preveda affollamenti significativi con riferimento ad un eventuale collasso della struttura. In sostanza,

la destinazione del manufatto è indissolubilmente legata all'incolumità pubblica e privata di cose e persone, la cui sicurezza è da salvaguardare.

La peculiarità ingegneristica è associata alla conformazione tipica di uno stadio. Per rendere l'idea è possibile pensare alle gradinate come un solaio inclinato che inviluppa il terreno da gioco e poggiate su una rete di travi e pilastri opportunamente organizzata.

Il materiale delle strutture in questione è rappresentato essenzialmente dal calcestruzzo armato, al più rinforzato da strutture metalliche; si può trattare di elementi gettati in opera oppure, in ossequio alle moderne tecniche e richieste prestazionali, di membri prefabbricati corredati da parti gettate in opera. In ambo i casi il ragionamento relativo alla modellazione strutturale e alla costruzione è il medesimo. Si pensi al caso prefabbricato per semplificare il concetto.

Al di sotto della porzione interessata vengono realizzate opportune fondazioni. A queste sono collegate i vari pilastri della struttura portante: essi sono organizzati secondo uno schema a griglia regolare e presentano altezza differente in base alla posizione occupata in tale griglia. I pilastri più vicini al terreno da gioco saranno più bassi rispetto a quelli più lontani, che raggiungeranno altezze maggiori, in accordo con la prevista inclinazione degli spalti. Generalmente, questi pilastri prefabbricati presentano ingrossi atti ad evitare rotture fragili in corrispondenza dei nodi: in questi punti vanno ad innestarsi, appoggiandosi, delle travi che collegano i pilastri di altezza differente tra loro, garantendo una maggiore rigidità del comportamento globale creato dal telaio 2D. Inoltre, travi in senso trasversale di dimensione minore collegano anche nell'altra direzione il complesso strutturale.

Alle sommità dei pilastri di altezza differente viene appoggiata e vincolata una trave inclinata, che ricorda la trave delle scale negli edifici di civile abitazione. In genere, è a superficie liscia inferiormente e a zig-zag superiormente, secondo la successione di alzate e pedate delle gradinate. Infatti, una coppia di travi di questo tipo, una a destra e una sinistra, costituisce gli appoggi di blocchi posti trasversalmente e per l'appunto appoggiati su queste travi inclinate. La loro forma tipica è a L, in modo tale che, la loro successione ad incastro consente di realizzare il susseguirsi di pedate e alzate, nonché per dar forma agli spalti su cui gli spettatori siedono. La gerarchia prevede, quindi: pilastri, travi principali, travi secondarie trasversali, travi inclinate, travi sagomate appoggiate trasversalmente.

Tutti componenti risultano collegati tra di loro per mezzo della tecnologia di precompressione, ottenendo complessivamente una struttura che lavora globalmente ma che può schematicamente essere modellata come piana (nel suo piano) senza commettere un errore significativo.

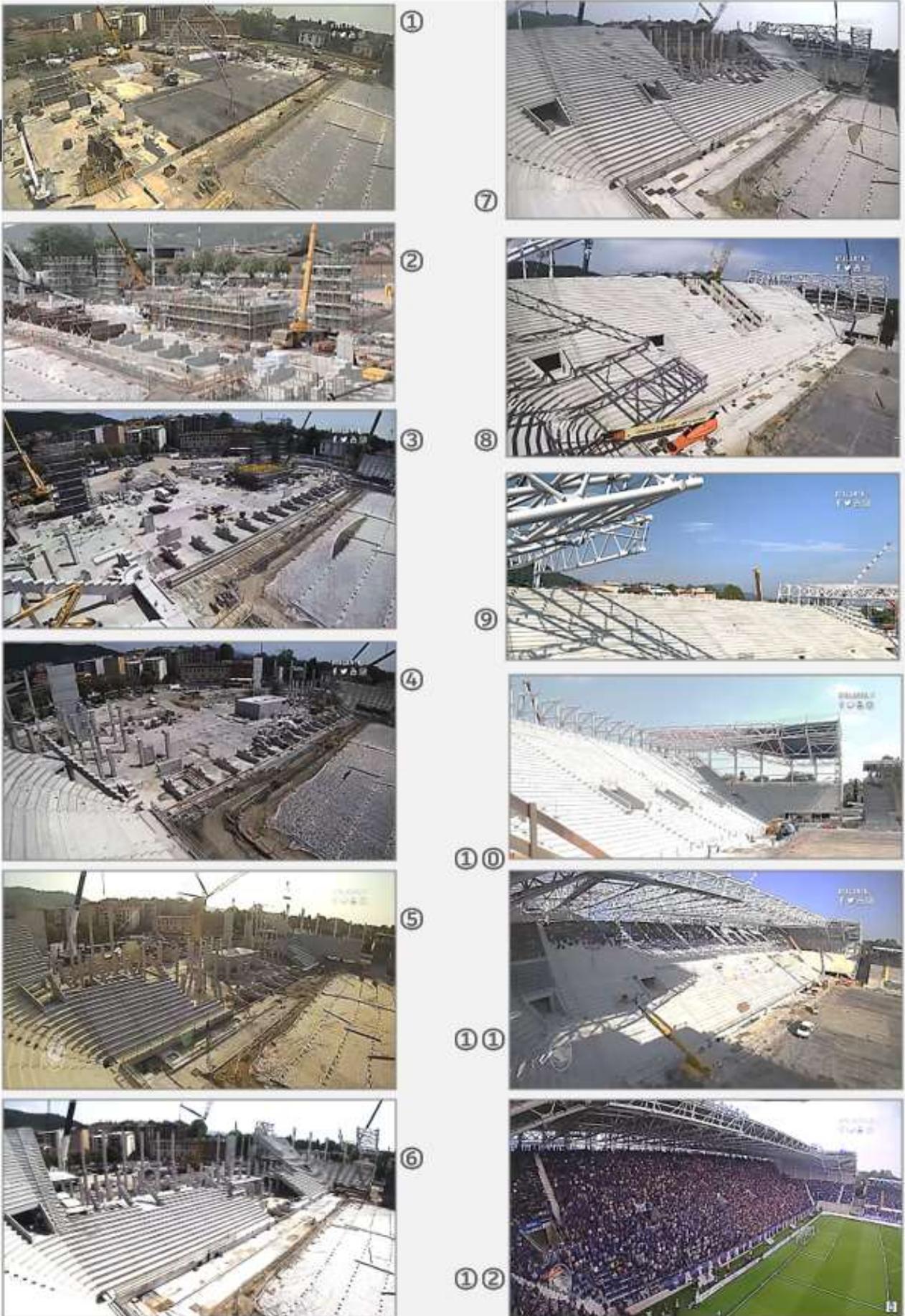


Figura 5.6. Fasi costruttive della struttura

Altra caratteristica importante degli stadi è la modularità. Nel complesso, è possibile concepire la struttura nella sua interezza come addizione di moduli connessi per mezzo di giunti strutturali. Questi moduli che rappresentano la realizzazione di quanto descritto si ripetono in modo più o meno regolare, a seconda della geometria dell'impianto, funzione del campo di gioco (pianta ovale o, più moderna, pianta rettangolare), e definiscono i telai a un certo interasse della struttura.

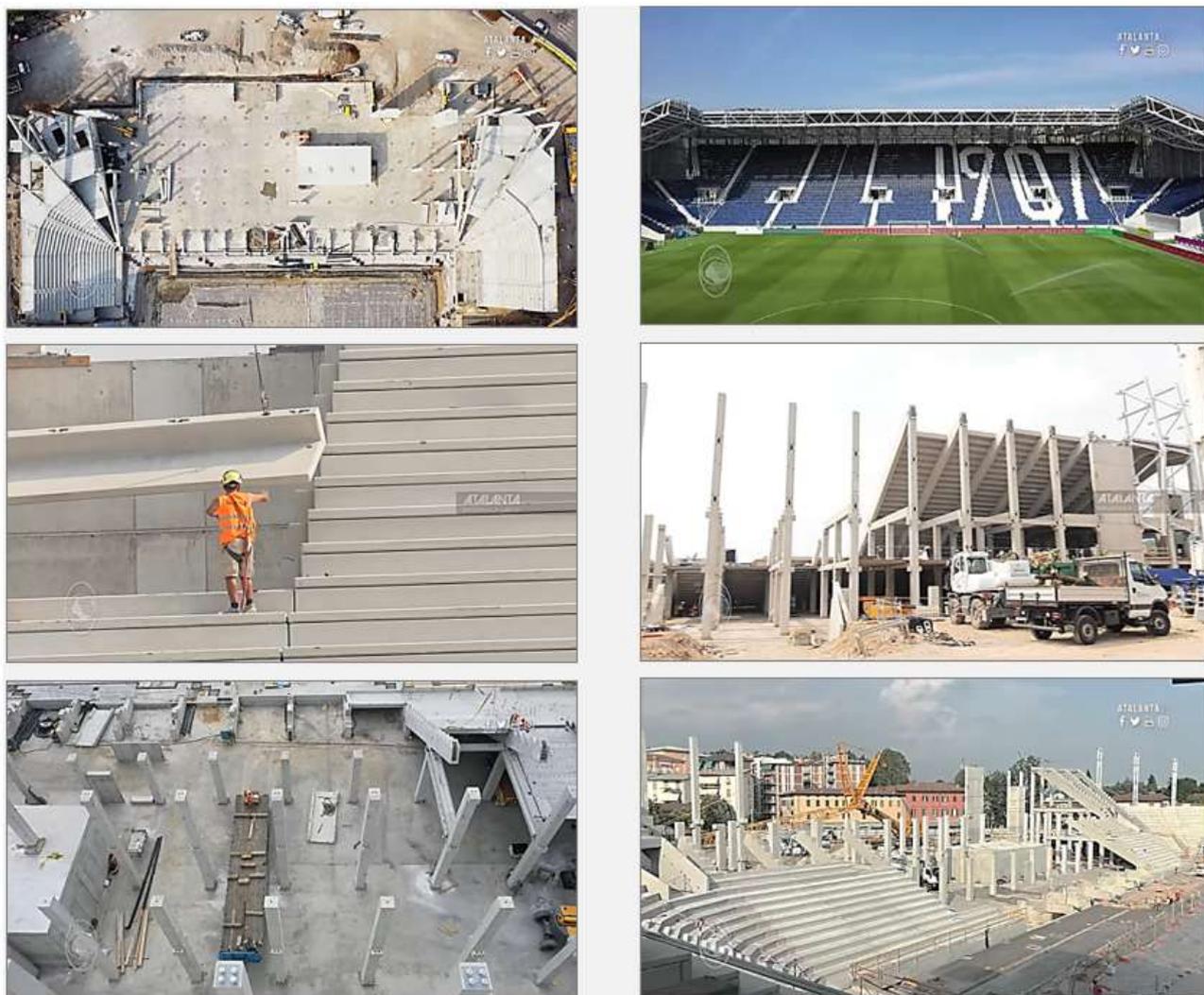


Figura 5.7. Particolari costruttivi e dettagli

Tra i membri gettati in opera vi sono generalmente anche i controventi associati alle strutture di copertura. In linea del tutto generale, essa può essere esterna alla struttura descritta sinora oppure, come accade nel caso in esame di sua integrazione successiva, consta di una parte in elevazione che si sviluppa aderente alla struttura in C.A., a cui è vincolata in corrispondenza dei pilastri più alti, che ha la funzione di sostenere la parte a sbalzo, pseudo-orizzontale di copertura propriamente detta. Questo telaio complessivo (a pseudo-L) 3D, che circonda la struttura in C.A., è fatto anch'esso di moduli costituiti da strutture reticolari o strallate in acciaio (o miste o ancora piene in C.A.); un gran numero di componenti metalliche consente il collegamento tra membrature e, infine, pannelli vengono posti sulla superficie

superiore e, talvolta, lateralmente per creare un effetto scenico. Nel caso di nuova costruzione, si assiste ad una crescita strutturale costante e proporzionale, con la copertura eretta sulle parti già costruite.

Infine, realizzate le opere strutturali, è possibile completare gli spalti con le opere accessorie (come parapetti, sedute, elementi strutturali secondari di corredo, impianti) e passare alla predisposizione dei locali interni, adibiti a svariati usi.

Ovviamente la casistica costruttiva è molto più ampia: è possibile ricorrere a varie tecniche (come le coperture sospese) di diversa natura però quanto descritto si può assumere come la configurazione tipo per il tipo di stadi storici esaminati, per i quali la struttura è in C.A. (senza le tecnologie di prefabbricazione moderne) e la copertura si “aggrappa” alla struttura esistente e consta di elementi reticolari e/o stralli.

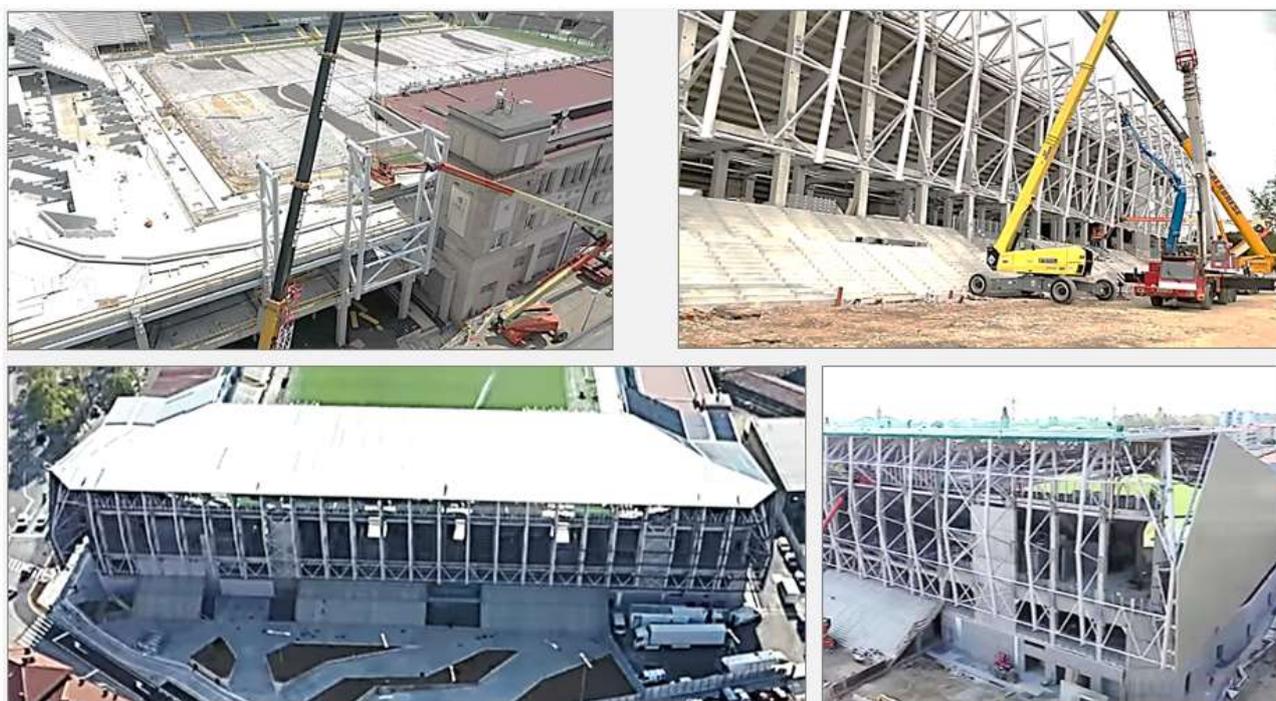


Figura 5.8. Particolare copertura

A conclusione di questa definizione tipologica dello stadio viene svolta un'analisi relativa alle dimensioni di queste strutture, fissando degli ordini di grandezza. Le dimensioni di uno stadio risultano molto specifiche, per cui generalizzare non è possibile. Indicativamente, l'altezza raggiunta dagli spalti con copertura è intorno ai 20 m, mentre le dimensioni in pianta derivano dalle misure fissate per il campo del calcio, dell'eventuale pista e altri spazi per la sicurezza, ma anche dal numero di spettatori in rapporto alla popolazione sportiva della località. La misura che generalmente si adotta, secondo le regole fissate per le partite internazionali è di m. 75×110 per il campo da calcio. A questi si devono aggiungere circa 35 m degli spalti, esternamente per ogni lato.

In pratica, lo stesso discorso vale per gli stadi esistenti di lunga storia preservati dal progetto di conservazione, come lo **stadio Olimpico Grande Torino**. La differenza sta nel fatto che la struttura in calcestruzzo armato è sorta in una prima fase, mentre la copertura è stata

integrata all'esistente successivamente. La struttura dell'Olimpico viene esaminata tenendo conto di tale sequela.

Sono serviti solo 180 giorni lavorativi (21 settembre-21 aprile) e 900 operai per la costruzione del manufatto, rappresentato da un anello ellittico continuo di 120 eleganti campate in C.A. ben evidenti dall'esterno e dall'interno. Originariamente era presente una pensilina a sbalzo lunga 176 m e con mensole aggettanti 11 m dai telai d'imposta. I materiali in origine impiegati risultano:

- 2.400 mc di cls di fondazione;
- 8.000 mc di cls armato (resistenza da prove di laboratorio: $R_{ck}=35$ MPa);
- 9.000 q di ferro omogeneo (FeB44K);
- 6.300 mq di pavimenti e rivestimenti in marmo.



Figura 5.9. Costruzione dello stadio (5° mese)

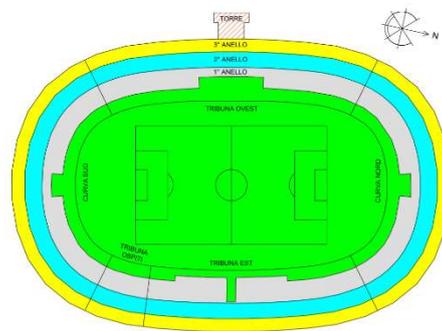


Figura 5.10. Composizione delle tribune

La struttura si sviluppa su 4 livelli: gradinata parterre, primo anello, secondo anello, terzo anello (nuova gradinata superiore connessa alla copertura metallica). In particolare, il primo livello (parterre, più vicino al campo da gioco) è giuntata al resto della struttura, con conseguente indipendenza della risposta strutturale.

La citata modularità si ritrova nei 120 telai che compongono la struttura, interconnessi tra loro e giuntati in blocchi di dimensioni differenti. Si distinguono 3 tipologie di blocchi:

1. Tipo 1: n.2 blocchi composti da 4 telai;
2. Tipo 2: n.4 blocchi composti da 7 telai;
3. Tipo 3: n.10 blocchi composti da 11 telai.

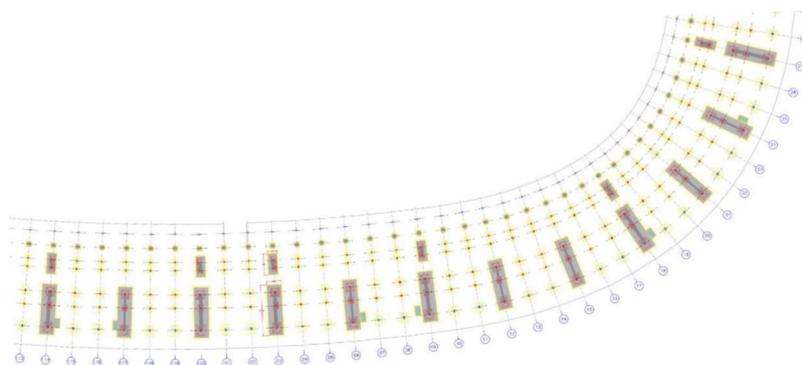


Figura 5.11. Stralcio della planimetria strutturale

I vari blocchi dello stadio sono delimitati da telai di giunto, ossia una coppia di telai gemelli che singolarmente sono meno spessi degli altri telai strutturali. Si evidenzia che la struttura nella relazione progettuale del 1928 non è stata calcolata per sisma, in accordo con le norme tecniche e la classificazione sismica dell'epoca. L'analisi strutturale è stata basata sulla teoria delle tensioni ammissibili; l'opera è stata calcolata come una serie di telai piani posti in direzione radiale rispetto al campo.

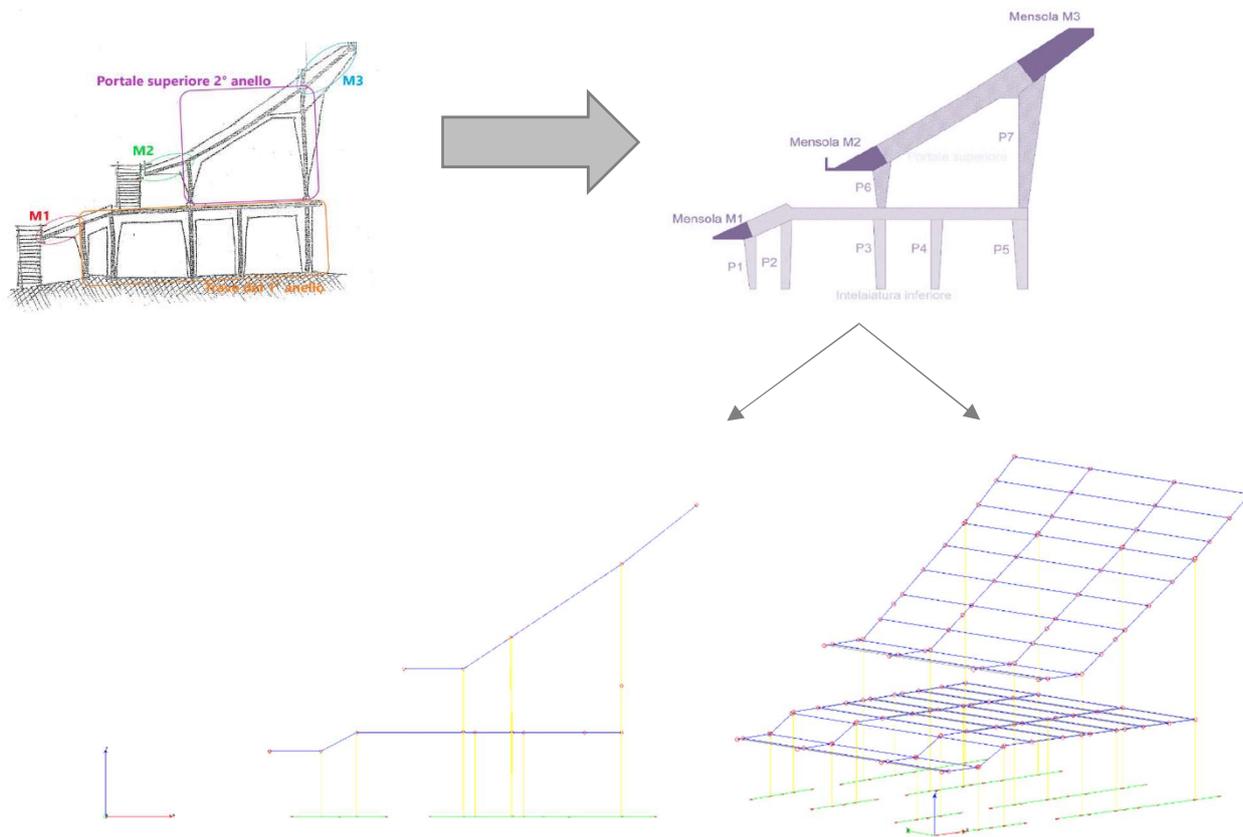


Figura 5.12. Dal progetto del 1928 al modello strutturale in versione originaria: telaio 2D e telaio 3D (blocco di tipo 1)

Per quanto riguarda l'interazione struttura-terreno, le modifiche delle fondazioni nel tempo sono state notevoli. Inizialmente la struttura poggiava su n.5 plinti, ciascuno corredato inferiormente da sottoplinto non armato e rettangolare. Con l'introduzione della copertura metallica, è stato inevitabile la modifica delle fondazioni, con intervento di introduzione di travi di fondazione: esse sono state create nei telai di giunto e connettono i plinti preesistenti (una coppia di travi: una per i 2 plinti più vicini al campo da gioco e una per gli altri 3). In aggiunta, il ricorso al *Jet-Grouting* ha consentito un ulteriore miglioramento della risposta del terreno.

In sostanza, si può affermare che l'impianto è rimasto invariato, in termini edilizi, dalla costruzione sino al 2006; questo è l'anno in cui lo stadio ha subito un determinante intervento di rifunzionalizzazione finanziato dal comune e finalizzata all'adeguamento per poter essere teatro delle cerimonie di Torino 2006 e per poter successivamente ospitare le partite in casa di Torino e Juventus. Essendo sottoposte al vincolo della Soprintendenza ai Beni Ambientali e Architettonici, le strutture esistenti sono state conservate nel progetto, il quale ha previsto

l'aggiunta di nuove strutture verticali per la copertura e il terzo anello di gradinate. Gli aspetti principali toccati dal progetto di ristrutturazione sono stati:

- rimozione della vecchia pensilina in C.A.;
- nuovo sistema di copertura totale metallica, con circa 1/3 del rivestimento in materiale plastico semitrasparente per evitare una ridotta insolazione del campo di gioco;
- costruzione di un terzo anello di gradinate composto da 5 gradoni, continuo e strutturalmente collaborante alla copertura;
- rinforzi delle strutture in C.A. (telai);
- interventi di rinforzo in fondazione;
- ampliamento ed adeguamento dei posti per il pubblico: in tal modo si è passati dai 65 mila, non coperti e in piedi, ai poco più di 27 mila, ognuno seduto e al coperto;
- parcheggio interrato per 109 auto;
- nuove scale di accesso alla tribuna superiore;
- aggiunta di 44 palchi in corrispondenza della vecchia unica zona coperta (lato ovest).

Gli interventi successivi a tale anno hanno riguardato l'aumento del numero di posti a sedere, portati agli attuali 28.177.



Figura 5.13. Progetto di restauro e rifunzionalizzazione dello stadio (arch. Cenna, Artecò)

Gli aspetti secondari dell'intervento hanno riguardato:

- separatori di settore interni ed esterni e adeguamenti recinzioni esterne;
- installazione dei display luminosi, con relativa struttura di supporto e passerella portacavi (sostenuti dalla struttura principale portante la copertura);
- installazione del sistema di ritegno della neve (antislavinamento) in copertura;
- installazione del sistema delle reti di protezione Settori Ospiti (con immorsamento alla trave di bordo posteriore e di collegamento trasversale dei telai principali).

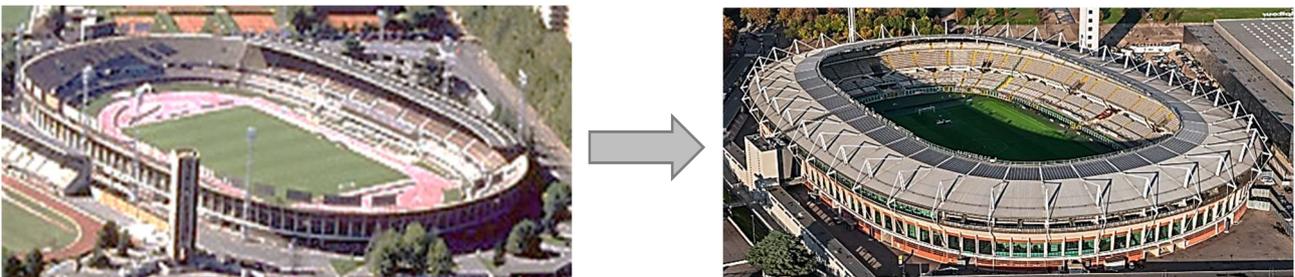


Figura 5.14. Evoluzione strutturale dello stadio Olimpico

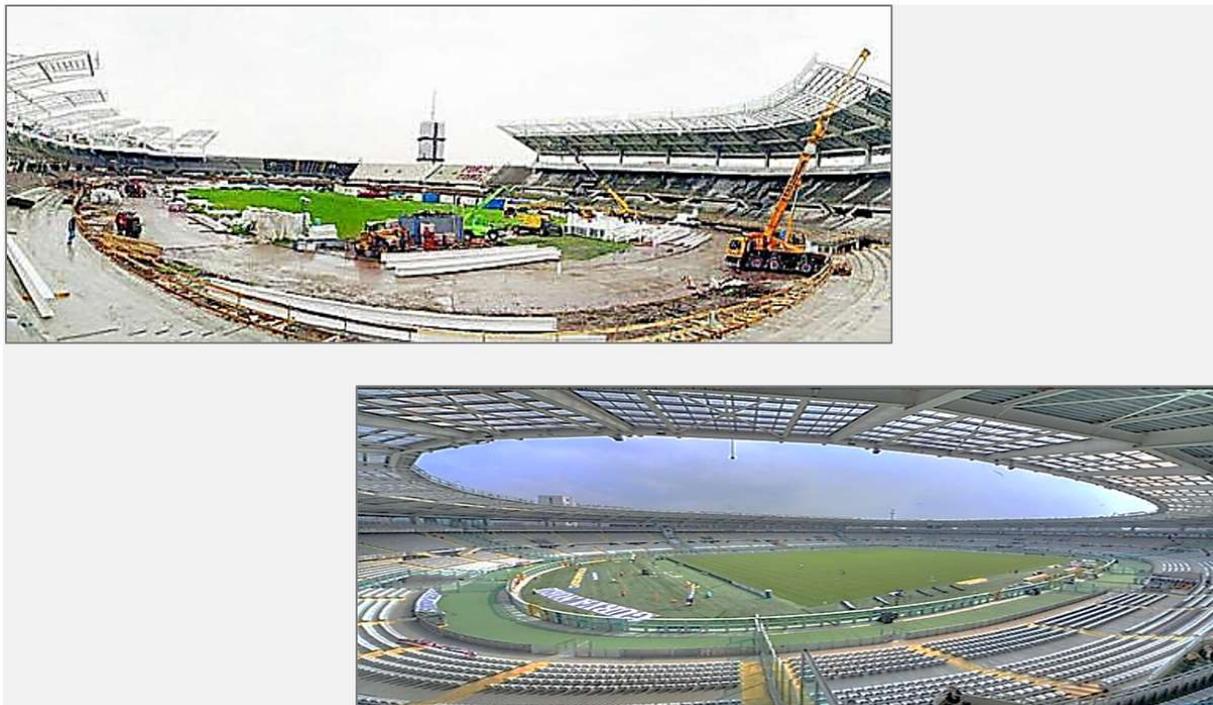


Figura 5.15. Panoramica a 360°: lavori in corso e risultato finale

Si procede all'analisi della variazione architettonica e strutturale più importante dell'intervento, rappresentata dall'integrazione della **copertura**, con ingenti implicazioni in termini di rinforzo strutturale degli altri elementi del manufatto. L'altro elemento peculiare dell'intervento è costituito dai rinforzi delle strutture esistenti per motivi di adeguamento strutturale, su cui ci si focalizzerà successivamente.

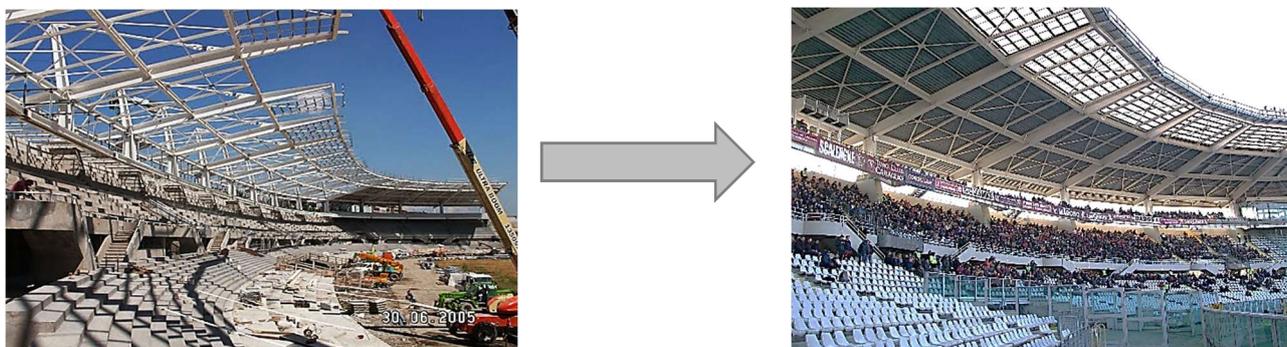


Figura 5.16. La costruzione della copertura e la completa inclusione nell'organismo strutturale

Per ciò che concerne la posa in opera del terzo anello e della copertura, essi sono rappresentati da un'unica struttura in acciaio collegata alle strutture esistenti in C.A.: 1/3 dei telai della struttura sono interessati dall'ancoraggio dei tiranti della nuova struttura metallica. Essenzialmente, tale copertura è costituita da una mensola tenuta in posizione per mezzo di un sistema di n.40 stralli in tre sezioni, vincolati alla struttura esistente e dotati di fondazioni proprie. Questo sistema di strallatura è in fondo l'elemento peculiare principale di questa struttura, in particolare dal punto di vista gestionale e manutentivo, dato che si rendono necessari controlli periodici e costosi, nonché ritesature, fondamentale garanzia della sicurezza dei fruitori. Il costo della copertura è stato di circa 5 milioni e 300 mila euro (stima di circa

200 euro a posto). Il corpo strutturale in questione, concepito come integrazione all'organismo esistente, può essere così modellato:

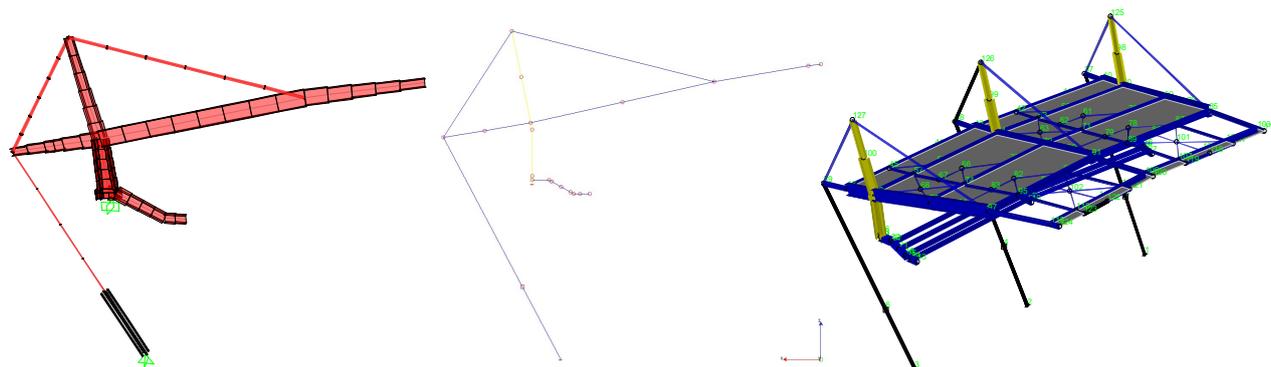


Figura 5.17. Telaio tipico della struttura inclusa e sua modellazione FEM; modello totale della copertura integrata

L'inclusione della copertura fa sì che si possano distinguere due tipologie di telai, in aggiunta a quanto definito originariamente: telai rinforzati portanti la copertura e telai esistenti. Strutturalmente, infatti, l'integrazione riguarda il rinforzo dei telai esistenti direttamente impegnati per il supporto della copertura e la posa in opera della struttura strallata. Il progetto ha previsto nuove strutture verticali a reggere la copertura e irrigidenti i telai esistenti: i nuovi telai in acciaio sono stati posti con passo di 15 m, ossia 3 passi della struttura esistente in C.A.

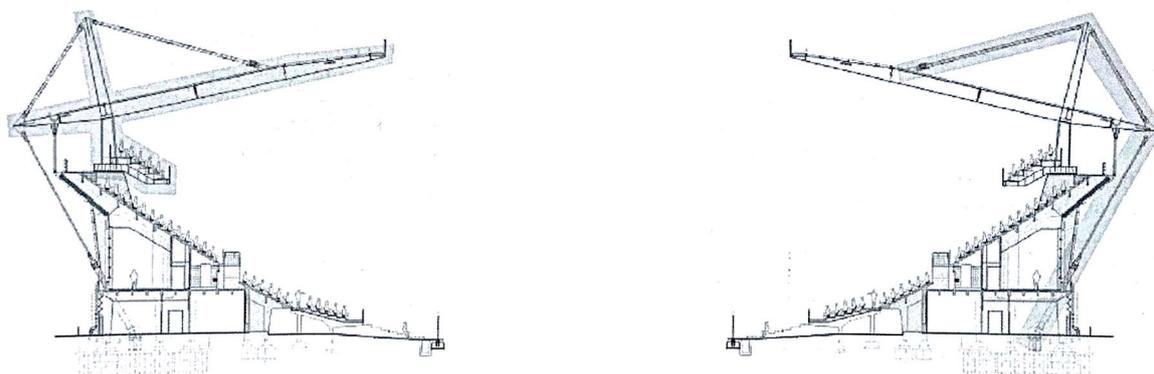


Figura 5.18. Sistema di copertura in carpenteria metallica (DX) e stralli di sostegno della copertura (SX)

Concettualmente, i componenti di quest'opera indipendente aggiunta in un secondo momento sono: la mensola reticolare associata alla copertura propriamente detta, le 5 file di gradinate del 3° anello, la colonna di vincolo al telaio esistente, lo strallo in 3 sezioni vincolato alle nuove fondazioni.

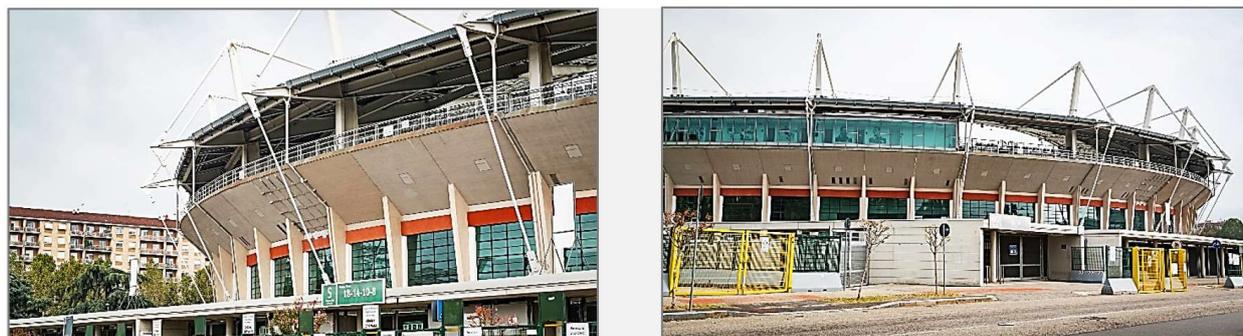


Figura 5.19. Lo stadio Olimpico con la nuova copertura e l'ampliamento delle tribune

La mensola è realizzata da una reticolare a prevalente sviluppo piano e tenuta in posizione da una parte tramite ancoraggio al telaio esistente e dall'altra per mezzo di un sistema di stralli dotati di fondazioni proprie.

La stabilità nei confronti del vento è conferita dalla solidarietà strutturale dei palchi e del terzo anello, che risultano appesi alla copertura: la portanza viene contrastata appesantendo le strutture appese, garantendo effettivamente sola trazione nei tiranti. Un altro ruolo importante è svolto dal controventamento di falda della reticolare.

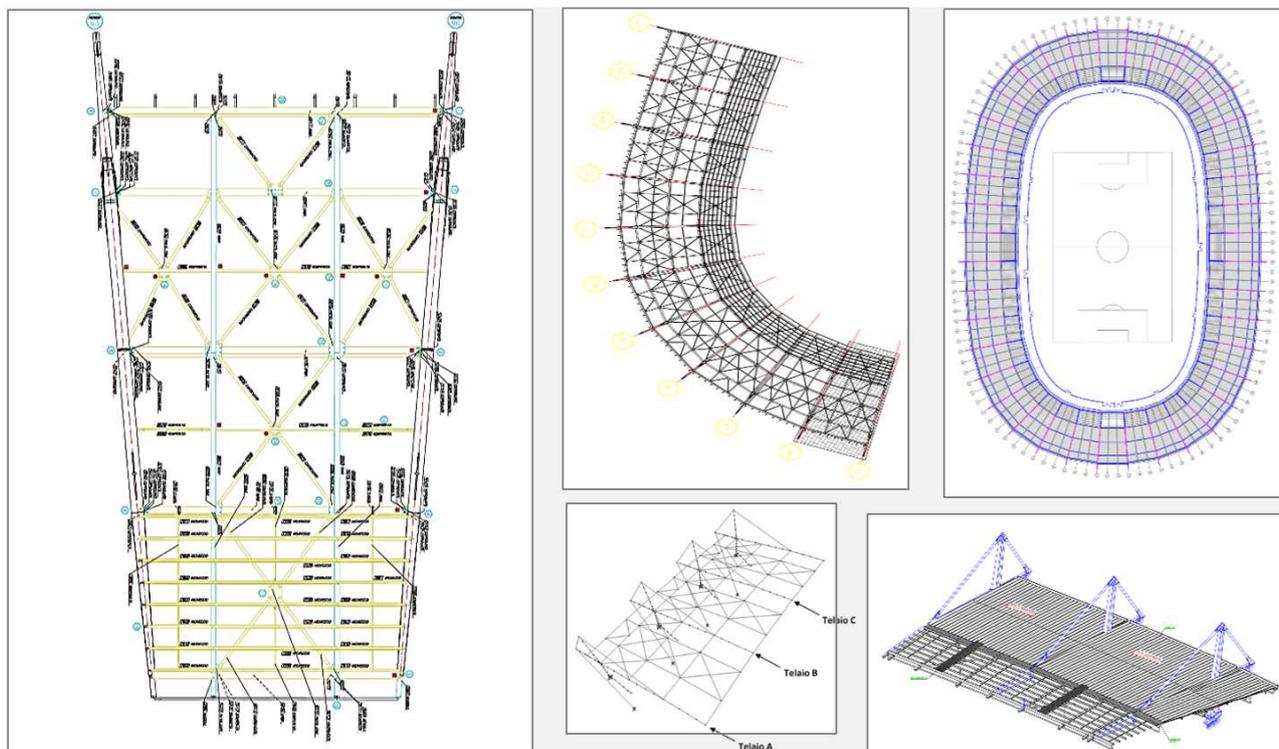


Figura 5.20. La struttura reticolare della copertura: inquadramento del campo di reticolare tipo

L'integrazione alla struttura esistente è avvenuta per mezzo di tirafondi di ancoraggio sia lato fondazioni che lato attacco 2° anello. Il seguente grafico riporta i particolari costruttivi riferiti alla copertura e alla sua aggiunta al complesso esistente:

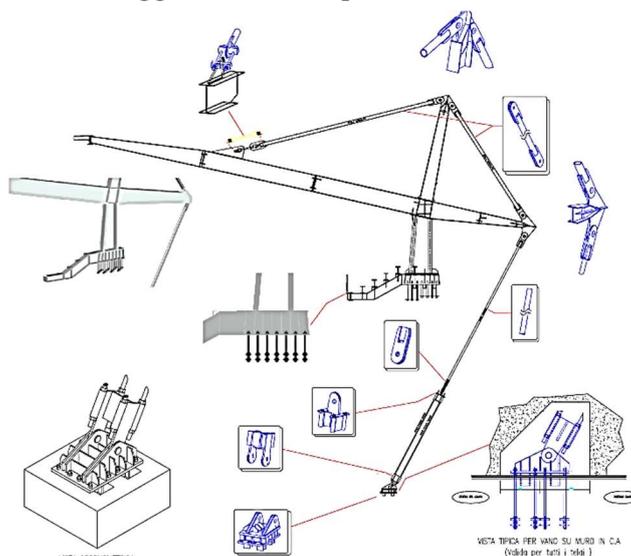


Figura 5.21. Particolari costruttivi dell'integrazione della copertura

A questo punto è possibile analizzare il complesso strutturale a intervento ultimato (modello attuale), ossia la forma in cui si presenta attualmente:

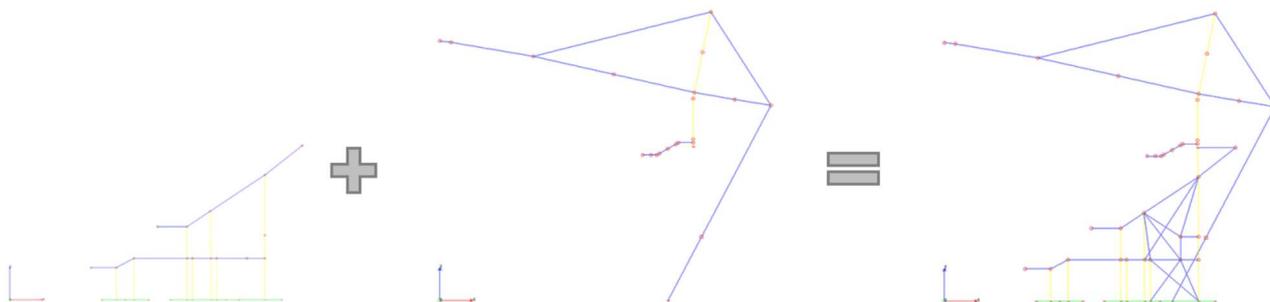


Figura 5.22. Evoluzione del modello strutturale: stadio Mussolini; integrazione della copertura; modello risultante ultimo.

Il telaio rinforzato adibito al sostegno della copertura assume il seguente schema finale e la sezione dell'impianto evolve di conseguenza:

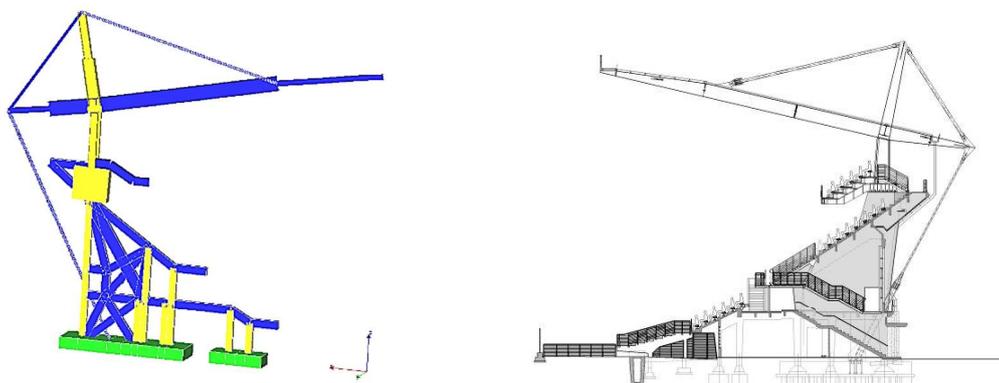


Figura 5.23. Telaio portante la copertura e sezione tipo del nuovo stadio: modellazione della struttura a telaio piano

Le strutture esistenti soggette ad interventi di rinforzo e ripristino e le nuove strutture in c.a. (tribune parterre) ed in carpenteria metallica (copertura e balconata III anello) sono state oggetto di *Certificazione di Idoneità Statica*.

Complessivamente, la struttura portante principale a telaio è costituita dalle due tipologie:

- Telai rinforzati portanti la copertura
- Telai esistenti

La descrizione e l'analisi delle strutture può quindi essere condotta seguendo la classificazione concettuale tra strutture esistenti soggette ad interventi di rinforzo e ripristino e nuove strutture dell'impianto.

STRUTTURE ESISTENTI	STRUTTURE NUOVE
Telai tipo portanti la copertura (n. 24)	Gradinate superiori
Telai di giunto (n. 16 telai, di 3 principali tipologie)	Gradinate inferiori
Telai intermedi (n.80 esistenti e non interessati dagli appoggi per la copertura)	Scale d'accesso alla tribuna superiore in carpenteria metallica
Travi secondarie longitudinali: <u>portagradoni</u> e gradoni	Realizzazione dell'"Area Palchi" (Lato Ovest – III anello)
Fondazioni telai e copertura	Copertura continua con telaio in acciaio Fe510/D
Inserimento di armatura integrativa in barre o rete elettrosaldata	Getti di ripristino con calcestruzzo additivato con resine e fibre

Figura 5.24. Riepilogo strutture dello stadio Olimpico Grande Torino

Nella configurazione attuale, si può concludere che lo stadio Olimpico di Torino è realizzato in C.A. e acciaio: la struttura è stata modificata per mezzo di rinforzi. In particolare, i primi due anelli, ossia quelli appartenenti alla struttura del 1933, sono in calcestruzzo e sono dotati di una serie di rinforzi strutturali in fibra di carbonio (CFRP) collocati in occasione della suddetta fondamentale ristrutturazione.

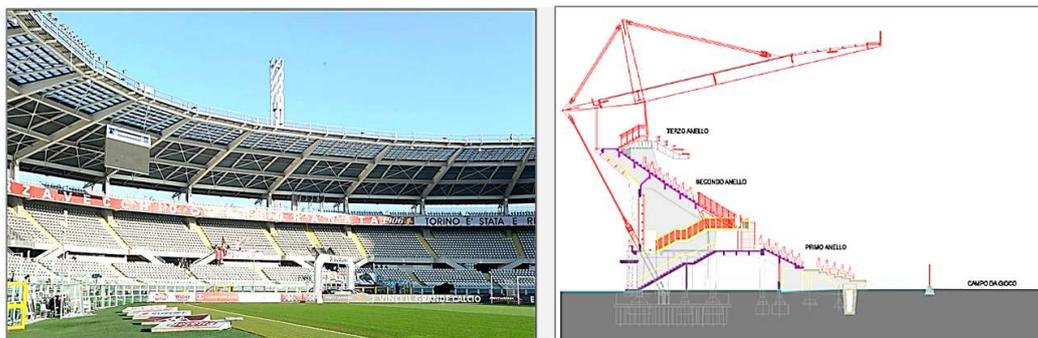


Figura 5.25. Rappresentazioni della struttura attuale dello stadio

I locali originari, arrivati ad oggi praticamente inalterati grazie ad un'opera di conservazione, sono rifiniti con granito bianco alla base e intonaco rosso superiormente e sono caratterizzate da ampi finestroni con strisce vetrate per l'illuminazione, a partire dal cui perimetro si innalzano pilastri in C.A. gettati in opera negli anni '30. Questi sostengono lo sbalzo terminale, il quale sporge per più di 3 m a 45°. All'interno del piano terra sono presenti tutti i locali dedicati agli atleti, ai giudici di gara, al personale, alle visite mediche e agli impianti tecnologici. È presente un corridoio centrale dal quale si accede ai diversi locali da ambo i lati. I vuoti presenti sotto le tribune sono dedicati alla distribuzione degli impianti tecnologici. Sono presenti alcuni vani scala e ascensore dai quali si raggiungono gli altri locali presenti al piano primo, che consistono principalmente in uffici e aree destinate alla ristorazione.

Per ciò che concerne le dimensioni, il perimetro è un vasto anello ellissoidale dallo sviluppo massimo di 645 m lineari, avente assi pari a circa 224.24 m e 146.7 m, per una superficie impegnata dal manufatto di circa 35.750 mq; gli spalti raggiungono altezze intorno ai 19 m mentre la copertura si estende per ulteriori 9.15 m, considerando gli stralli di sostegno. L'altezza della copertura dal livello di gioco è di 26 m. In pianta gli spalti occupano circa 28 m intorno al campo da gioco, mentre la copertura li contiene, con i suoi poco più di 32 m.

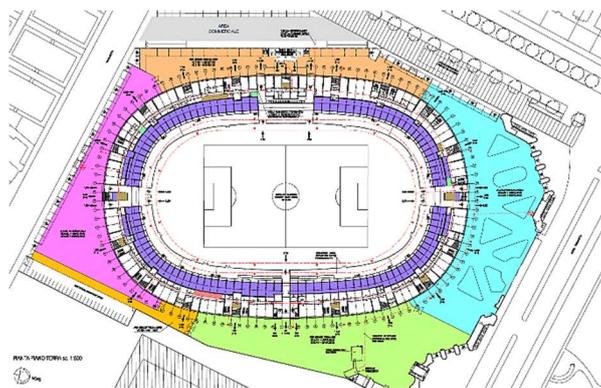


Figura 5.26. Planimetria dello stadio Olimpico Grande Torino

Capitolo 6

Soluzione di monitoraggio dello stadio Olimpico Grande Torino

6.1 Lo stadio Olimpico Grande Torino

6.1.1 Descrizione generale

Lo stadio Olimpico costituisce un impianto polifunzionale, dedicato in misura principale al gioco del calcio e situato nel parco di Piazza d'Armi, nel quartiere Santa Rita, zona centro-sud della città di Torino. L'impianto può ospitare anche incontri di rugby e manifestazioni extra-sportive come concerti. Nel suo ricco passato ha ospitato al suo interno il Museo dello Sport (2012-2015) e la sede torinese del Centro di Medicina per lo Sport (dal 1962). Di proprietà del Comune di Torino, il Torino Calcio ne è beneficiario unico dal 2011. È classificato in categoria 4 UEFA, quella con il livello tecnico più alto; in Italia solo 4 stadi soddisfano tale requisito (anche Allianz Stadium, San Siro e Olimpico di Roma). I costi di ricostruzione si aggirano intorno ai 30 milioni di euro.

L'Olimpico è il primo impianto in Italia a rispettare le indicazioni della Legge Pisanu sulla sicurezza negli stadi. È dotato di telecamere di videosorveglianza e gode di elevato apporto tecnologico, come serpentine di riscaldamento del terreno di gioco e sistema di copertura automatica del terreno con teloni.

Come già espresso, la capienza è di 28.177 posti a sedere e coperti. Il primato di pubblico è stato registrato per il concerto di Madonna (Who's That Girl Tour) con un totale di 63.127 spettatori; mentre, relativamente alle partite, sono stati raggiunti 27.941 spettatori (17 ottobre 2009). Per quanto riguarda la configurazione, lo stadio è diviso in 4 settori, disposti su 3 anelli e coperti:

1. Distinti Granata: disposto su tre livelli;
2. Tribuna Granata: al suo interno si trovano anche i palchi, la tribuna d'onore e altri settori speciali;
3. Curva Primavera: è intitolata alle squadre giovanili del Torino, e comprende al suo interno un settore dedicato alla tifoseria ospite;
4. Curva Maratona: ristrutturata per le Olimpiadi 2006.



Figura 6.1. Mappa dei settori dello stadio (tuttostadi.com)

La pubblica utilità del bene rende necessario il *collaudo tecnico-amministrativo* della struttura con cadenza decennale.

6.1.2 Conservazione del manufatto

Il certificato di collaudo statico prevede un apposito paragrafo dedicato alle prescrizioni per la sorveglianza e la manutenzione nel tempo. Si sottolineano in sintesi le principali attività previste a controllo dello stato di degrado dei manufatti strutturali. Anche in considerazione dei considerevoli tassi di lavoro cui sono soggetti alcuni elementi portanti esistenti, non oggetto di interventi di rinforzo, oltre che del fatto – attestato dalle dichiarazioni rese dagli stessi professionisti incaricati della progettazione – che la struttura non può ritenersi, nel suo complesso, possedere requisiti antisismici ai sensi della normativa vigente, si configura la necessità di provvedere alle attività manutentive con strategia preventiva e programma di controlli ed interventi a cadenza più ravvicinata rispetto a quella prevista; ei casi più delicati, ad una notevole riduzione (anche al 50%) della frequenza delle attività manutentive. Con particolare riferimento ai “nodi critici” individuati in seguito come punti di riferimento per il monitoraggio, si sottolinea che i relativi controlli, ispezioni e misurazioni devono essere effettuati con cadenza semestrale nei primi due anni di esercizio e puntualmente a seguito di precipitazioni nevose molto intense.

Strutture in C.A.

Il collaudo Tecnico-Amministrativo deve tener conto degli aggiornamenti rispetto alle lavorazioni eseguite e si associa a quanto di seguito riportato:

- revisione dei programmi dei controlli e degli interventi con adozione di strategia preventiva in relazione agli effetti di disgregazione e distacco dei materiali in corrispondenza delle gradonate e delle sottogradonate in c.a. (con particolare attenzione alla nuova balconata del terzo anello a struttura mista in acciaio e cls, i cui eventuali distaccamenti, anche di piccole entità, costituiscono potenziale rischio di danno grave in presenza di spettatori);

- adeguamento del manuale di manutenzione e del sottoprogramma dei controlli e degli interventi per quanto inerente al tamponamento perimetrale inclinato esterno in pannelli tipo “aquapanel”, mediante l’esplicitazione della periodicità di ispezione (almeno a cadenza annuale) per il controllo dei fissaggi al telaio portante ed alla struttura in c.a.;
- adeguamento del manuale di manutenzione e del sottoprogramma dei controlli e degli interventi per quanto inerente al controllo dei fissaggi dei pluviali alla struttura in c.a., e più in generale gli elementi/i componenti con potenziale rischio di caduta dall’alto su spazi percorribili, adottando strategia di intervento preventiva e non a guasto avvenuto:
- monitoraggio periodico delle zone oggetto di intervento di consolidamento con fibre di carbonio (con previsione degli interventi necessari a garantirne l’accessibilità e l’ispezionabilità, nel caso, ad esempio della trave anulare in c.a. o delle zone interrato in corrispondenza dei collari di base dei pilastri esistenti del telaio inferiore);
- monitoraggio periodico, con cadenza mensile dei controlli, dell’eventuale quadro fessurativo in corrispondenza delle strutture principali a telaio e dei solai in c.a. esistenti (a Q. +3,90 m) e non oggetto di interventi di rinforzo, soggetti ad elevato impegno statico.

Strutture metalliche

A seguito dell’analisi del Piano di Manutenzione si ritiene vi siano elementi/componenti della struttura di copertura (il riferimento si intenda particolarmente mirato al posizionamento ed all’ancoraggio di base degli stralli posteriori) che, a fronte della centrale importanza statica rivestita, risultano difficilmente ispezionabili per il loro intero sviluppo e soggette a degrado. Si prescrive pertanto esplicitazione delle modalità e della frequenza di ispezione, controllo e test dei tratti terminali degli stralli posteriori (n.4 barre Macalloy Ø50) di ancoraggio di base della struttura di copertura, che dovranno garantire il rispetto dei requisiti di cui alla norma BS4486, secondo quanto prescritto dal Certificato di fornitura del materiale.

Famiglia / Elementi	CONTROLLI		INTERVENTI	
	Tipo	Frequenza	Tipo	Frequenza
Strutture interrate				
di contenimento	Visivo	12 mesi		Quando occorre
di fondazione	Visivo	6 mesi		Quando occorre
Strutture elevazione				
Orizzontali o inclinate	Visivo	6 mesi		Quando occorre
Verticali	Visivo	6 mesi		Quando occorre
Pareti esterne				
Murature c.a.	Visivo	2 anni	Pulizia e ripristino dei giunti	5 anni
			Trattamento consolidamento	5 anni
			Rimozione zone in fase di sfaldamento	40 anni
Coperture piane				
Struttura in c.a.	Visivo	12 mesi		Quando occorre
Solai				
In c.a.	Visivo	6 mesi	Consolidamento solaio	Quando occorre
Scale e rampe				
In c.a.	Visivo	6 mesi	Ripristino stabilità corrimano e balaustre	Quando occorre
			Ripristino serraggi bulloni e connessioni metalliche	2 anni
Gradinate				
Sedute; Parapetti e divisori	Visivo/Ispez. strumentale	1 settimana	Ripristino stabilità parapetti e ringhiere	Quando occorre

Figura 6.2. Controlli e interventi sulle strutture in C.A.

Famiglia / Elementi	CONTROLLI		INTERVENTI	
	Tipo	Freq.	Tipo	Frequenza
Scale e rampe				
In acciaio	Visivo	6 mesi	Ripristino stabilità corrimano e balaustre	Quando occorre
			Ripristino serraggi bulloni e connessioni metalliche	2 anni
Attrezzature esterne				
Cancelli – cerniere e guide di scorrimento	Visivo	2 sett	Ingrassaggio degli elementi di manovra	1 mese
Elementi a vista	Visivo	6 mesi		Quando occorre
Recinzioni				
Elementi a vista	Visivo	2 anni		Quando occorre
Strutt. portanti copertura	Visivo	6 mesi		Quando occorre
1. Ancoraggio di base	Stato cons verniciatura	5 anni		Quando occorre
2. Perni e rondelle perni	Serraggio vite di fermo M24 del perno Ø140	5 anni		Quando occorre
3. Attacco strallo anter.	Tratt. protez. superfic.; geometria perno	5 anni		Quando occorre
4. Sigillatura strallo post.	Tratt. protez. superfic.; geometria, tenuta	2 anni		Quando occorre
5. Bullonatura generale	Strumentale serraggio	5 anni		Quando occorre
6. Parapetti	Strumentale serraggio	2 anni		Quando occorre
7. Passerella e grondaia	Strumentale serraggio	2 anni		Quando occorre
8. Copertura e fissaggi	Bullonature e rivettature	2 anni		Quando occorre
9. Cavi di sicurezza	Chiusura bulloneria e morsetti di fissaggio; Stato conservazione funi e corrosione trefoli	2 anni		Quando occorre
10. Tesatura stralli	Stato tensionale	5 anni	Ritesatura con martinetti oleodinam.	Scostamenti >±10%
11. Ancoraggi e tesatura stralli	Stato tensionale	3 anni	Regolaz. simultanea 4 tiranti posteriori (martinetti oleodin.)	Scostamenti >±8%
	Visivo 20% tiranti (senza smontaggio, anche per impuntature, stress corrosion, tagli)	1 anno	Sostituzione tiranti	Quando occorre
	Visivo e gradi di arruginimento 10% tiranti (con smontaggio barre)	5 anni	Sostituzione tiranti	Quando occorre

Figura 6.3. Controlli e interventi sulle strutture metalliche

Piano di manutenzione

L'antica natura e la storia travagliata a causa dei molteplici interventi di trasformazione e riqualificazione subiti sono le ragioni alla base delle problematiche che hanno interessato l'aspetto manutentivo dello stadio Olimpico di Torino, come testimoniato dall'intricata esperienza associata ai piani di manutenzione dello stesso.

In primis, all'epoca di costruzione non erano previsti gli obblighi normativi di oggi; ciò ha fatto sì che l'opera rimanesse sprovvista per lungo tempo di un documento di raccolta dei controlli necessari per garantire il corretto mantenimento.

La svolta è stata rappresentata dalla massiccia ristrutturazione di inizio secolo. La realizzazione delle nuove opere (copertura e rinforzi delle strutture in C.A. su tutte) ha messo in evidenza il problema di mancanza di comunicazione tra i documenti riguardanti le diverse parti del manufatto, i quali risultavano ancora frammentati.

A questa presa di coscienza, negli anni recenti, è seguita una revisione globale del piano di manutenzione; tale lavoro è culminato nella redazione di un nuovo documento unico di raccolta e armonizzazione delle informazioni dei progettisti delle singole parti strutturali stilato dagli Archh. L. e G. Cenna (Manuale e programma di manutenzione – agg. del 19.06.2006). Tale risultato ha come obiettivo il controllo e il monitoraggio puntuale e sistematico di ciascun componente dell'impianto. Il documento parte dai piani di manutenzione esistenti, richiamati

ed integrati, e consta di 30 schede, relative ai diversi componenti dell'opera e con informazioni circa:

- documentazione tecnica;
- indicazione fotografica;
- localizzazione elemento/i;
- controlli previsti e relativa frequenza;
- interventi richiesti e loro cadenza temporale;
- qualifica richiesta per il personale addetto.

A titolo informativo, ad esempio, la scheda n.30 riguarda gli stralli e la loro tesatura.

Piano di monitoraggio

Pur essendo chiara l'importanza che riveste il monitoraggio strutturale nei confronti di una struttura dalla storia così travagliata e dall'utilizzo così rilevante, attualmente le strutture dello stadio Olimpico di Torino non sono dotate di sistemi per il monitoraggio continuo dello stato dei diversi elementi e materiali. Un fitto piano di controlli (come appena menzionato) compensa tale mancanza; si tratta in particolare di verifiche frequenti sulle condizioni di lavoro e di conservazione dei nodi e degli elementi significativi a livello di comportamento globale (ad es., verifica biennale dello stato tensionale degli stralli di sostegno della copertura).

È chiaro che questo approccio al controllo del manufatto è costoso e ripetitivo al fine di identificare anomalie (in questo caso delle strutture di copertura); in ottica futura, il risparmio e l'efficientamento della gestione della struttura passano inevitabilmente dall'integrazione di un sistema di monitoraggio.

6.2 Pianificazione del sistema di monitoraggio dello stadio Olimpico

SHM dello stadio Olimpico:

Strumento di controllo della sicurezza attraverso la conoscenza

Le caratteristiche particolari dello stadio Olimpico di Torino evidenziano la necessità di pianificare una apposita soluzione di monitoraggio strutturale; la sua storia travagliata, fatta di variazioni strutturali a diversi livelli e significative integrazioni, e la pubblica utilità dell'opera rivolta ad un ampio bacino di utenza, che fa di essa una struttura speciale, sono gli elementi da cui nasce l'esigenza di attivare un processo di diagnostica continua del manufatto.

A ciò si aggiungano altri aspetti, non di meno conto:

- le opere strutturali dello stadio non sono state calcolate per il sisma;
- il rilevante utilizzo del bene pubblico fa sì che ogni 10 anni l'opera debba essere collaudata;
- la mancanza di monitoraggio viene compensata da visite, prove, verifiche e ispezioni finalizzate al controllo dell'opera.

In particolare, queste ultime operazioni risultano frequenti, costose e dispendiose, oltre a non garantire in modo continuativo la sicurezza sullo stato di salute: si tratta di prove di carico (in primis per gradinate e parapetti), prove di caratterizzazione dinamica una tantum (sulla struttura portante la copertura), verifiche di strallatura, prove effettuate sui materiali, prove statiche sulle strutture in c.a. esistenti (rinforzate e non) e di nuova realizzazione, prove statiche e dinamiche sulle gradinate in acciaio.

In tal contesto lo SHM si configura come la chiave che consente di ottimizzare il processo diagnostico: un sistema di monitoraggio si traduce in automatizzazione del controllo della struttura ed efficientamento della gestione del manufatto. Le procedure di collaudo possono essere viste come inglobate nella competenza del monitoraggio, senza altre prove e verifiche puntuali, in ogni caso evitabili in quanto integrate nello SHM. In aggiunta, anche l'operazione fondamentale di valutazione della tesatura può essere sostituita dal controllo diretto tramite il sistema. Il vantaggio del monitoraggio sta in questa semplificazione e nel cambio di filosofia del controllo, da periodico una tantum a continuo, con notevole riduzione dei rischi legati all'uso del bene.

A garantire il successo dell'implementazione del sistema di monitoraggio è la conoscenza strutturale che ne deriva, requisito fondamentale della manutenzione. Questo è ancor più evidente per questo stadio e più in generale per la tipologia costruttiva in esame, in cui la rilevazione di parametri come vibrazioni, spostamenti, accelerazioni causati dai carichi e in modo particolare dagli spettatori agli eventi assume un'importanza notevole. Il carico della folla durante gli eventi, in particolare, è estremamente variabile, concentrato temporalmente e di non facile schematizzazione: dallo spettatore, infatti, deriva un'azione dinamica, ciclica (specie nell'atto del salto ripetuto durante un coro), ripetuta che tende in modo non regolare a sollecitare la struttura, sottoposta ad un processo di fatica. Per questo motivo il numero di impianti dotati di sistema di monitoraggio o con sistema in pianificazione è consistente e vede a livello nazionale: la *Sardegna Arena* di Cagliari, lo *Stadio Giuseppe Meazza* di Milano, l'*Allianz Stadium* di Torino, il *San Paolo* di Napoli. In questi casi la caratterizzazione strutturale avviene per mezzo dell'identificazione dinamica e del monitoraggio dei suddetti valori: in definitiva, il sistema di monitoraggio assume il ruolo di circuito di controllo unico per l'intero manufatto e l'informazione passa solo da esso.

I paragrafi precedenti costituiscono strumento fondamentale per la conoscenza di base della struttura esaminata, punto di partenza per la pianificazione del sistema di monitoraggio tarato su di essa e che tenga conto delle sue complessità.

Una conoscenza approfondita della struttura esistente passa inevitabilmente anche da un'accurata analisi strutturale; essa rappresenta il riferimento rigoroso da cui trarre considerazioni per la definizione del sistema. La fase di modellazione strutturale è già stata trattata nel paragrafo relativo alla struttura dello stadio; a questo punto si forniscono ulteriori informazioni

sul modello di calcolo dell'analisi, i cui risultati tenso-deformativi vengono esaminati gradualmente e in modo specifico nel processo di progettazione del sistema. L'impiego dei risultati del monitoraggio consentirà di verificare la corrispondenza tra comportamento teorico e reale, permettendo eventuali successivi aggiustamenti.

Analisi strutturale

Le analisi strutturali agli elementi finiti sono state condotte tramite il software di calcolo *WinStrand* della *EnExSys*. L'analisi svolta è un'analisi dinamica modale, l'analisi per eccellenza per strutture in zona sismica. Tutti gli elementi strutturali portanti sono stati schematizzati nel modello di calcolo con l'elemento "Trave" (Frame), inputando le proprietà geometriche-inerziali relative alla sezione considerata. Dall'analisi dei file AutoCAD riguardanti l'edificio dello stadio è stato costruito un telaio modello secondo le linee medie degli elementi strutturali che definiscono la sezione trasversale della struttura. Il telaio in analisi è il telaio di giunto 03, costituito dai seguenti componenti strutturali: fondazioni (nello schema: in verde), pilastri dei portali delle gradinate (in giallo), travi portagradinate con parte terminale a sbalzo (in blu), rinforzi del telaio di giunto (in blu), copertura e stralli (in blu), colonne di sostegno della mensola di copertura (in giallo). Per tener conto dei ringrossi sezionali che irrigidiscono i nodi, in corrispondenza dell'intersezione travi-colonne, nella modellazione si è fatto uso di link rigidi in tali posizioni. I risultati vengono visualizzati direttamente sul telaio, assunto come riferimento per la progettazione del sistema. Al fine di ottenere una descrizione completa del comportamento sismico, il modello è evoluto nella forma di blocco: a partire dal telaio piano, è stato costruito un blocco di tipo 1 (composto da 4 telai: 120, 01, 02, 03). Su quest'ultimo sono state condotte le analisi, da cui derivano le considerazioni sulla progettazione del sistema SHM. L'archetipo del telaio continua però ad essere valido: infatti, lo stadio Olimpico risulta essere un edificio regolare in pianta ed irregolare in elevazione, secondo le NTC18. L'irregolarità in elevazione è dovuta alla mancata estensione di tutti i sistemi resistenti verticali per l'intera altezza. Di conseguenza, l'analisi modale può essere applicata ai modelli piani dell'edificio. L'analisi strutturale è stata sviluppata per livelli, partendo dall'analisi del telaio di giunto 03 (analisi piana) e culminando nello studio del blocco 120-01-02-03 (analisi 3D): i risultati sono conformi e ciò convalida il modello 3D, adoperato come riferimento per la progettazione del sistema di monitoraggio. Per completezza, si riportano i risultati di ambo i modelli.

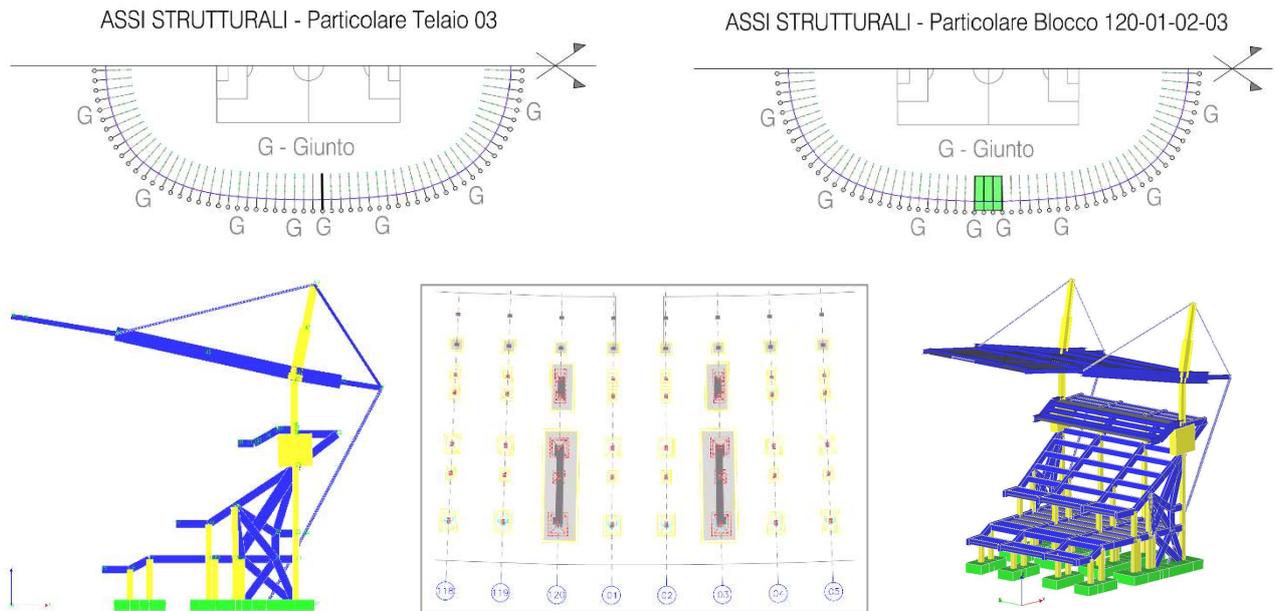


Figura 6.4. Modellazione strutturale: telaio di giunto 03; blocco 120-03

- Rappresentazione grafica del modello *Telaio piano 03*:

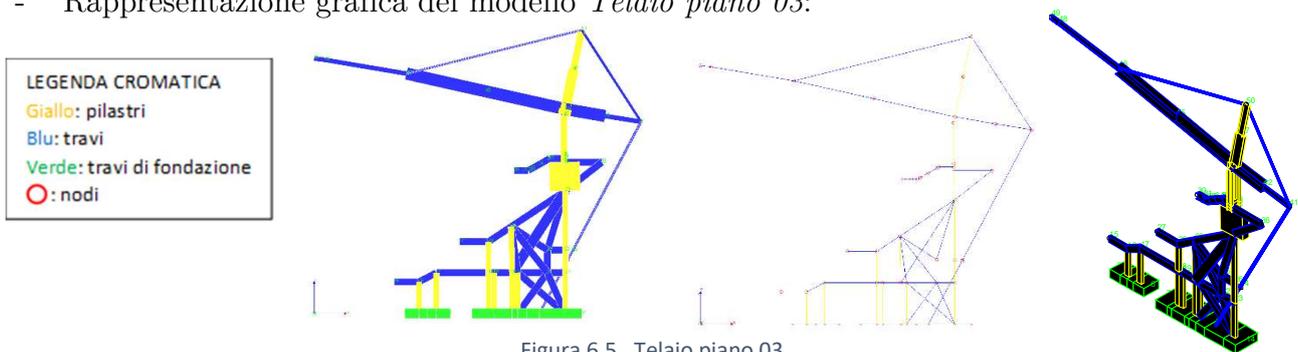
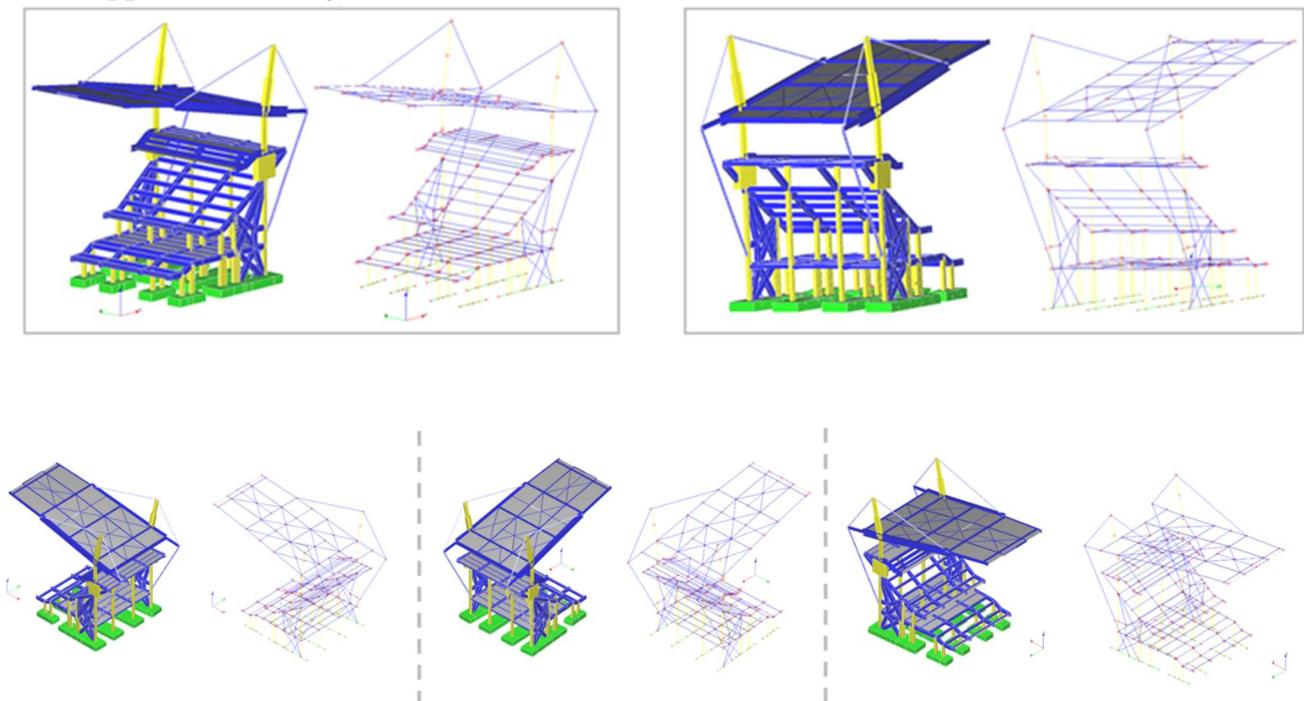
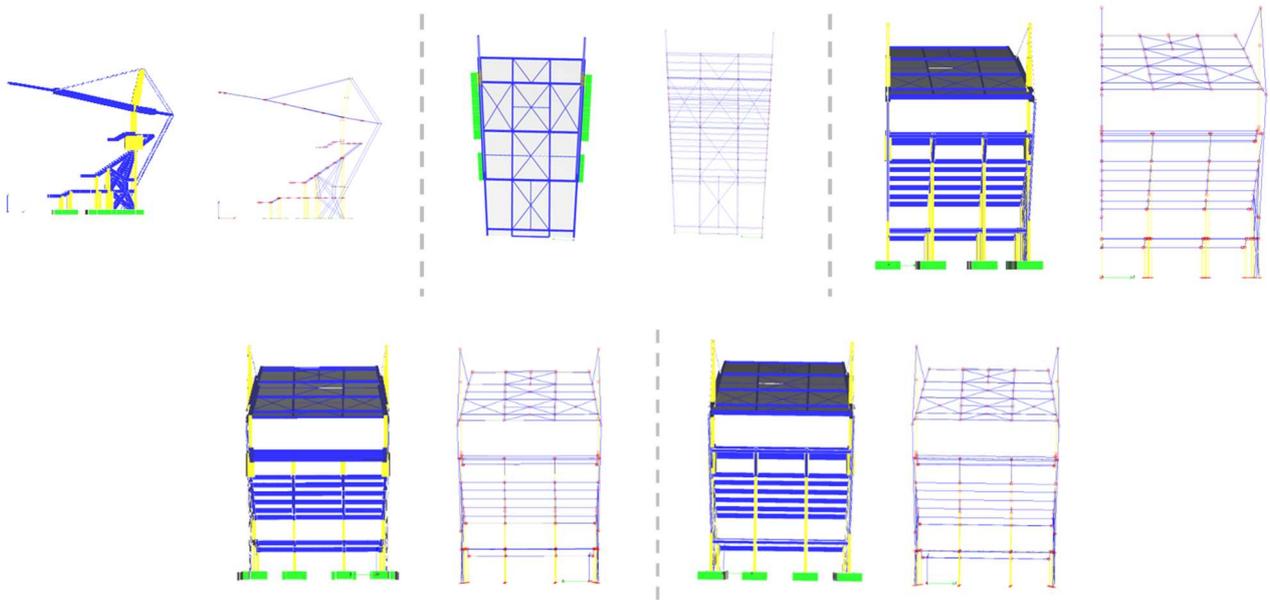


Figura 6.5. Telaio piano 03

- Rappresentazione grafica del modello *Blocco 120-03*:





Di seguito si riportano i dati relativi alla modellazione, espressi in forma tabellare.

Materiale Numero	Info	E [kg/cm ²]	v	α 1/[1/°C]	Peso Specifico [kg/m ³]
1	FE 360	2100000.0	0.33	0.000012	7850.0
2	FE 430	2100000.0	0.33	0.000012	7850.0
3	FE 510	2100000.0	0.33	0.000012	7850.0
4	Funi	1650000.0	0.33	0.000012	7850.0
5	Teflon	10000.0	0.33	0.000012	10.0
6	Rbk 200	254558.0	0.12	0.000012	2500.0
7	Rbk 400	360000.0	0.12	0.000012	2500.0
8	Rbk 300	300000.0	0.12	0.000012	2500.0

Figura 6.6. Materiali

Sezione	Materiale	Dimensioni [cm]	PILASTRI
1	3		CollaudoCDS B_600x1000x250x20
2	3		CollaudoCDS C_600x100x30x15
3	8	B= 85 H= 300	Sperone
4	8	B= 55 H= 35	Pilastri Telaio esistente
5	3		CollaudoCDS C1_400x650x30x15 Antenna C1
6	8	B= 35 H= 55	Pilastri Telaio esistente

Figura 6.7. Pilastri

Sezione	Area [cm ²]	Jx [cm ⁴]	Jy [cm ⁴]	Jt [cm ⁴]	Xx	Xy
1	628.00	1247357	245119	669437	2.6	2.5
2	501.00	950903	108026	416372	3.3	1.6
3	25500.00	191249984	15353124	54837740	1.2	1.2
4	1925.00	196510	485260	458539	1.2	1.2
5	331.50	274313	32017	114211	3.3	1.6
6	1925.00	485260	196510	458539	1.2	1.2

Figura 6.8. Sezioni pilastri

Sezione	Materiale	Dimensioni [cm]	TRAVI
3	3		CollaudoCDS A1_600x1200x25x15
4	3		CollaudoCDS A2_300x450x25x15
5	3		CollaudoCDS A3_300x450x20x10
6	3		CollaudoCDS A_600x1200x30x15
21	3		CollaudoCDS TE_360x600x12x8(D.B.)
23	3	R= 13	Circolare McHalloy diam64
24	3	R= 14	Circolare Stralli_S2
25	8	B= 70 H= 35	Puntoni setto
26	8	B= 15 H= 60	Travi gradonate 1°, 2° anello
27	8	B= 20 H= 45	Travi solaio, corsello
29	3		Tubi 244.5x20 Stralli_S3
30	3		HEA 240
32	3		CollaudoCDS TA1_320x600x14x8
33	3		Tubi 108,0x5 Controventi Copertura
34	3		TD 360x700x15x10
35	3		TB1_TC1 360x700x15x8
36	8	B= 35 H= 70	Travi Telaio esistente
37	8	B= 35 H= 100	Travi Telaio esistente
38	3		G1 650x700x40x20 Gradonate Incastro
39	3		G2 550x660x25x5 Grad_Seduta
40	3		G3 450x650x25x15 Grad_Corsello
41	2		G4 3020x465x15x8 Travi Gradino

Figura 6.9. Travi

Sezione	Area [cm ²]	Jx [cm ⁴]	Jy [cm ⁴]	Jt [cm ⁴]	Xx	Xy
3	472.50	1225734	90072	761063	2.6	1.8
4	211.50	79653	11262	34773	3.1	1.5
5	161.00	61253	9003	23134	3.6	1.5
6	531.00	1417473	108032	741852	3.0	1.7
21	132.48	87431	9334	51002	2.8	1.7
23	514.72	21083	21083	42166	1.0	1.0
24	615.75	30172	30172	60344	1.0	1.0
25	2450.00	250104	1000417	686797	1.2	1.2
26	900.00	270000	16875	62313	1.2	1.2
27	900.00	151875	30000	88358	1.2	1.2
29	140.69	8910	8910	17632	1.5	1.5
30	76.99	7778	2769	42	4.2	1.4
32	135.36	89412	7648	49965	2.8	1.7
33	16.14	214	214	426	1.5	1.5
34	350.00	303549	23340	200671	2.5	1.8
35	161.60	146762	11667	80284	2.9	1.7
36	2450.00	1000417	250104	686797	1.2	1.2
37	3500.00	2916667	357292	1183404	1.2	1.2
38	644.00	606695	183125	161659	4.6	1.4
39	366.50	305733	69340	114063	3.7	1.5
40	315.00	246844	37986	108469	3.3	1.6
41	124.80	51067	6752	22018	3.4	1.6

Figura 6.10. Sezioni travi

Sezione	Materiale	Dimensioni [cm]	BIELLE
2	3		Strallo 244.5x20
23	3	R= 13	Circolare n.4 McHalloy diam64
24	3	R= 14	Circolare Stralli_S2

Figura 6.11. Bielle (stralli)

Sezione	Area [cm ²]	Jx [cm ⁴]	Jy [cm ⁴]	Jt [cm ⁴]	Xx	Xy
2	140.69	8910	8910	17632	1.5	1.5
23	514.72	21083	21083	42166	1.0	1.0
24	615.75	30172	30172	60344	1.0	1.0

Figura 6.12. Sezioni bielle

Sezione	Materiale	Dimensioni [cm]	TRAVI DI FONDAZIONE
3	8	B= 300 H= 100	Rett. II Anello Terreno numero 5 Ghiaie con sabbia (10-30 kg/cm ³)
4	8	B= 200 H= 100	Rett. I Anello Terreno numero 5 Ghiaie con sabbia (10-30 kg/cm ³)

Figura 6.13. Travi di fondazione

Sezione	Area [cm ²]	Jx [cm ⁴]	Jy [cm ⁴]	Jt [cm ⁴]	Xx	Xy
3	30000.00	25000000	225000000	84453744	1.2	1.2
4	20000.00	16666667	66666668	45767428	1.2	1.2

Figura 6.14. Sezioni travi di fondazione

Numero	k Winkler [kg/cm ³]	σ_{\max} [kg/cm ²]	TERRENI
1	0.5	1.0	Torbe (0.5-1 kg/cm ³)
2	3.0	1.0	Sabbie (1.5-4 kg/cm ³)
3	8.0	1.0	Argille (8-12 kg/cm ³)
4	10.0	1.0	Sabbie compatte (8-15 kg/cm ³)
5	20.0	1.0	Ghiaie con sabbia (10-30 kg/cm ³)

Figura 6.15. Terreni

Per quanto riguarda l'analisi dei carichi, le tabelle seguenti riassumono i sovraccarichi adottati, le condizioni di carico introdotte (con il valore di ciascuno dei carichi agenti), le combinazioni delle azioni definite, in relazione all'analisi del modello nella combinazione SLU fondamentale. La successiva figura rappresenta in maniera schematica come i carichi sono stati disposti sulle differenti componenti strutturali.

STRUTTURA	Posizione	Tipo	Sovraccarico
GRADINATE	Parterre	nuovo	4 kPa
	1°-2° anello	esistente	5 kPa
	3° anello	nuovo	5 kPa
SCALE	1°-2° anello	esistente	5 kPa
	3° anello	nuovo	5 kPa
	Interne sottogradinate	nuovo	5 kPa
SOLAI	Quota +3.90m	esistente	4 kPa
PALCHI	3° anello	nuovo	5 kPa
COPERTURA	Copertura	nuovo	1 kPa
PARAPETTI	Tribune anello 1°,2°,3°	nuovo	1.5 kPa·m

Figura 6.16. Riepilogo analisi dei carichi di progetto

N.	CONDIZIONE DI CARICO	TIPO
1	Peso proprio	G - Permanenti
2	Permanenti Copertura (All.72 = 67,9 kg/ml)	G - Permanenti
3	Permanenti Gradoni (All.72 = 5959,29 kg/ml)	G - Permanenti
4	Permanenti Soletta Q=+3,90 (2790 kg/ml)	G - Permanenti
5	Permanenti I anello (2660 kg/ml)	G - Permanenti
6	Permanenti II anello (3020 kg/ml)	G - Permanenti
7	Variabili folla (500 kg/mq) Soletta Q=+3,90 (2600 kg/ml)	Q - Variabili
8	Variabili folla (500 kg/mq) I anello (2400 kg/ml)	Q - Variabili
9	Variabili folla (500 kg/mq) II anello (2600 kg/ml)	Q - Variabili
10	Variabili folla (500 kg/mq) Gradoni III anello (8200 kg/ml)	Q - Variabili
11	Variabili neve (160 kg/mq) su copertura escluso passerella (2070 kg/ml)	Q - Variabili
12	Variabili neve (160 kg/mq) su passerella (2400 kg/ml)	Q - Variabili
13	Variabili vento pressione copertura (1290 kg/ml)	Q - Variabili
14	Variabili vento pressione facciata (400 kg/ml)	Q - Variabili
15	Variabili vento dirX III anello (1220 kg/ml)	Q - Variabili
16	Variabili vento dir-X III anello (-1220 kg/ml)	Q - Variabili
17	Variabili vento dir-X II anello (-400 kg/ml)	Q - Variabili
18	Variabili vento dir-X II anello (400 kg/ml)	Q - Variabili
19	Variabili vento dir-X Copertura (96 kg/ml)	Q - Variabili
20	Variabili vento dir-X Copertura (96 kg/ml)	Q - Variabili
21	ΔT uniforme = +25°C	Q - Variabili
22	ΔT uniforme = -25°C	Q - Variabili
23	ΔT incrociato = 15°C	Q - Variabili
24	Pretensionamento Stralli St1 lato campo (34000 kg)	G - Permanenti
25	Pretensionamento Stralli St3 retro tribune (47000 kg)	G - Permanenti

Figura 6.17. Condizioni di carico identificate

N.	COMBINAZIONE DELLE AZIONI
1	Peso proprio (PP)
2	PP + permanenti
3	PP + permanenti + folla
4	PP + permanenti + folla + ΔT_{unif}
5	PP + permanenti + folla + ΔT_{unif} + neve
6	PP + permanenti + folla + ΔT_{unif} + neve 50%+ passerella
7	PP + permanenti + vento dir X
8	PP + permanenti + vento dir -X
9	PP + permanenti + neve + vento 70%+ ΔT_{incr}
10	PP + permanenti + folla (1° anello) + vento 70%dir X
11	PP + permanenti + folla (1°-3° anello) + neve 50%+ vento 50%+ ΔT_{incr}
12	PP + permanenti + ΔT_{unif}^+
13	PP + permanenti + ΔT_{unif}^-
14	PP + permanenti + ΔT_{incr}
15	PP + permanenti + neve + vento 50%+ ΔT_{incr}

Figura 6.18. Combinazione delle azioni di progetto

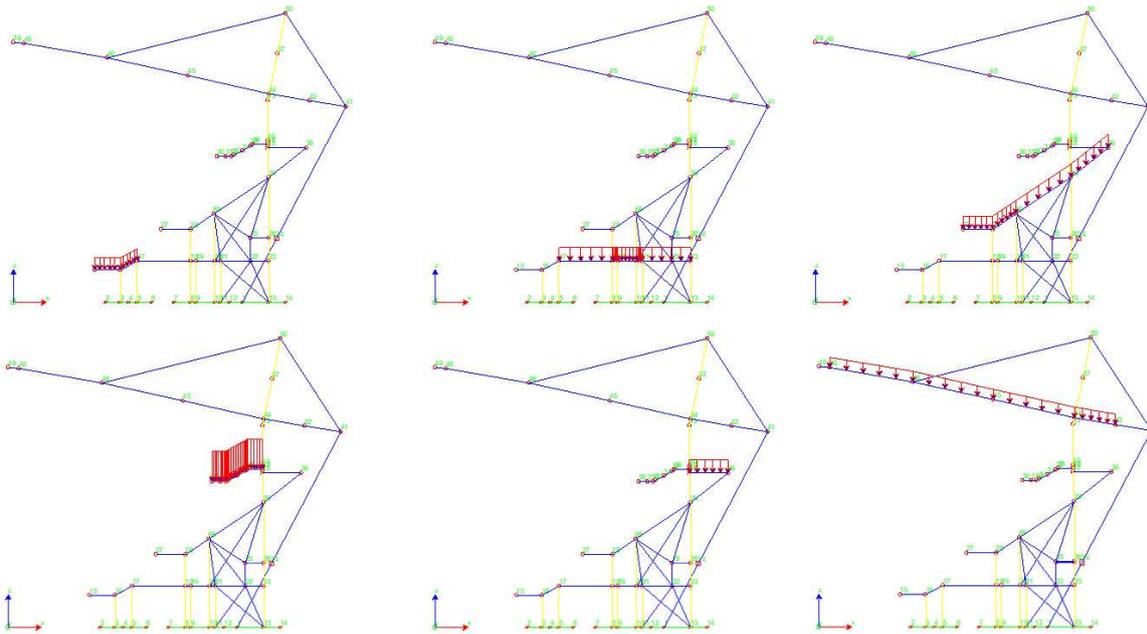


Figura 6.19. Caricamento delle diverse componenti strutturali dello stadio (vista telaio):
1° anello, soletta, 2° anello, 3° anello, corsello, copertura

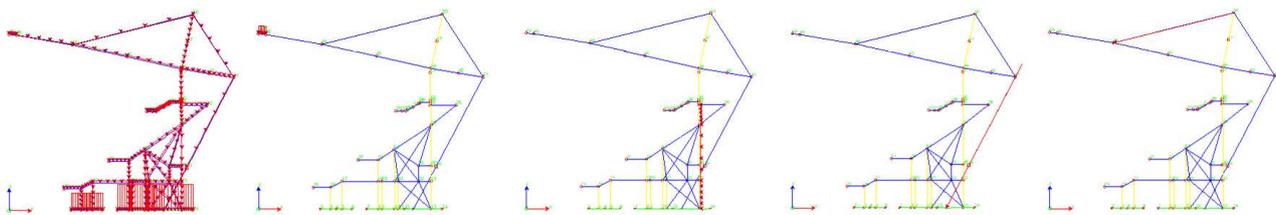


Figura 6.20. Particolari della modellazione dei carichi (vista telaio):
peso proprio, passerella, vento su facciata, stallone lato campo (St1) e stallone retro tribune (St3)

A questo punto si consideri l'azione sismica. Il calcolo dell'azione sismica inizia utilizzando il programma Excel *Spettri-NTCver.1.0.3* dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per calcolare i parametri e il grafico dello spettro di risposta orizzontale dello SLV. All'interno del programma vengono inseriti i vari dati di input, che permettono di ricavare gli output riguardanti lo spettro di risposta, inserito nel programma di calcolo strutturale. Le direzioni del sisma prese in considerazione risultano 0° e 90° , rispetto al sistema di riferimento giacente nel piano del telaio (0° significa in tale piano), in ambo i versi.



Figura 6.21. Valutazione dello spettro di risposta tramite *Spettri-NTCver.1.0.3*

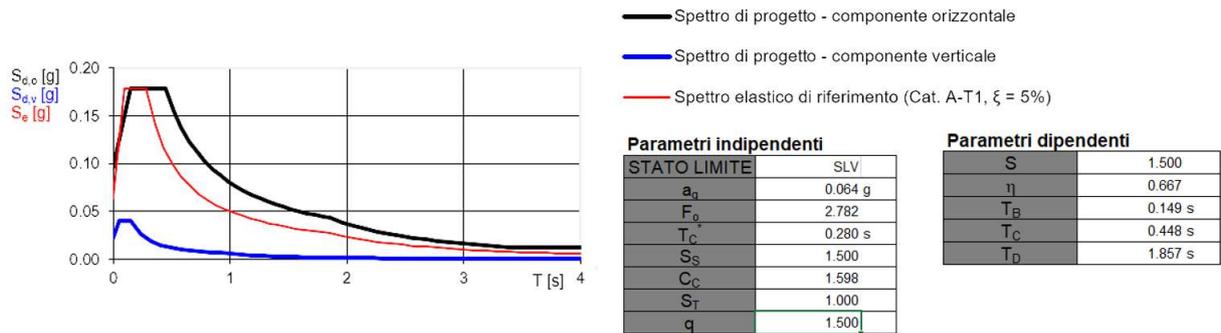


Figura 6.22. Spettro di risposta adoperato nell'analisi modale

In relazione al comportamento dinamico della struttura e alle sue capacità dissipative, il fattore di struttura q viene posto pari a 1.2. Esso dipende dalla tipologia strutturale, dal grado di iperstaticità e dai criteri di progettazione e si calcola moltiplicando i coefficienti q_0 e K_R . Il primo è il valore massimo del fattore di struttura. In primis, potendo facilmente ipotizzare che la gerarchia delle resistenze non risultasse in uso nell'anno di progettazione dello stadio (1928), è opportuno assegnare la classe di duttilità media (CD "B"). Il secondo coefficiente è un fattore riduttivo che dipende dalla regolarità strutturale e vale 0.8 dato che lo stadio è irregolare in altezza ma regolare in pianta. Tuttavia, dato che il tipo di struttura dello stadio non rientra nelle 4 proposte delle NTC, a favore di sicurezza, si assegna il valore di 1.5 per q .

Un primo sguardo ai risultati è rappresentato da Fig. 6.23, la quale riporta gli involuipi delle 3 caratteristiche di sollecitazione indotte sul riferimento del telaio. Un'analisi più approfondita e approfondimenti di dettaglio vengono proposti nel corso della fase di progettazione del sistema, in cui i risultati dell'analisi rientrano tra le motivazioni delle scelte prese.

- Output del modello *Telaio piano 03*:

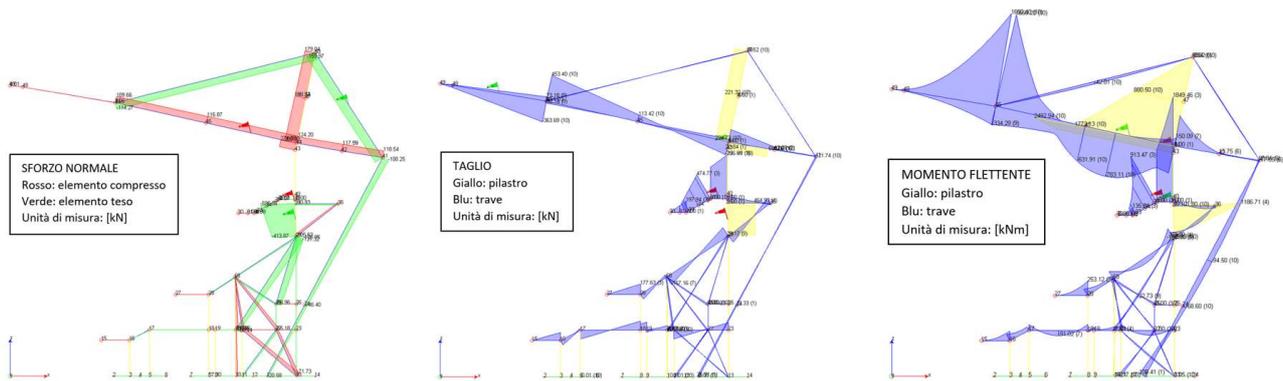


Figura 6.23. Involuipi di sforzo normale, taglio e momento flettente (piano YZ)

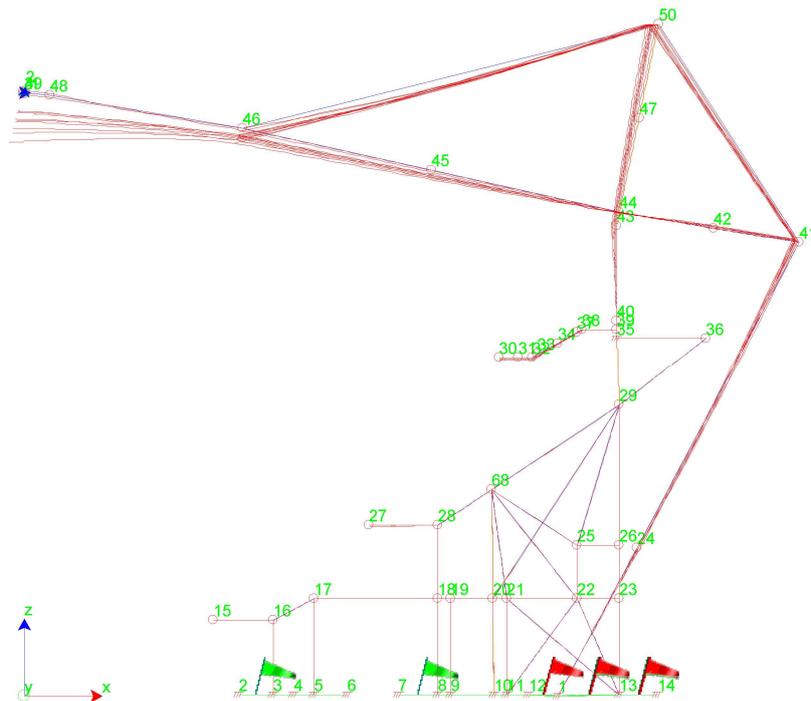


Figura 6.24. Involuppo delle deformate

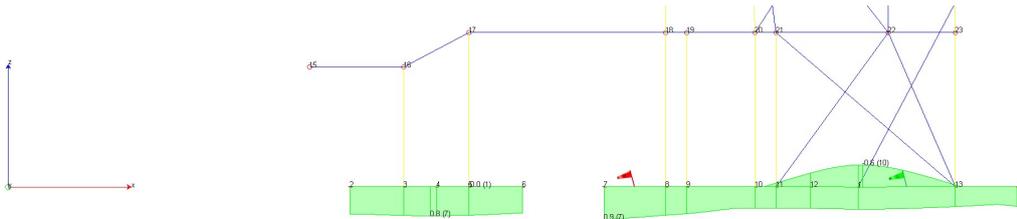


Figura 6.25. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: involucro delle pressioni sul terreno [kg/cm²]

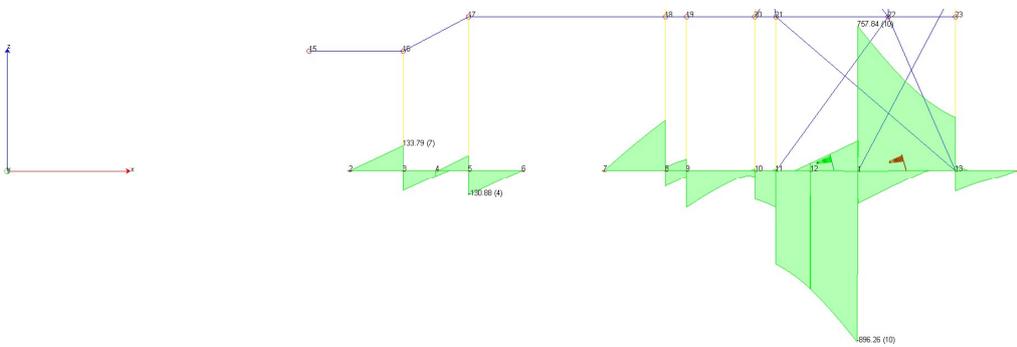


Figura 6.26. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: involucro del taglio [kN]

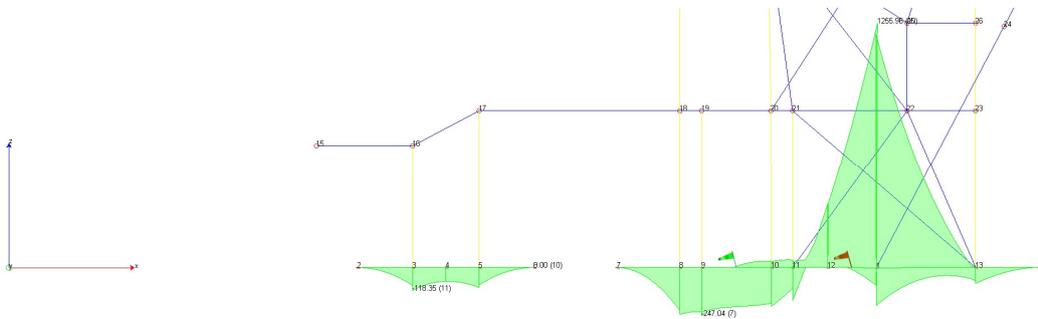
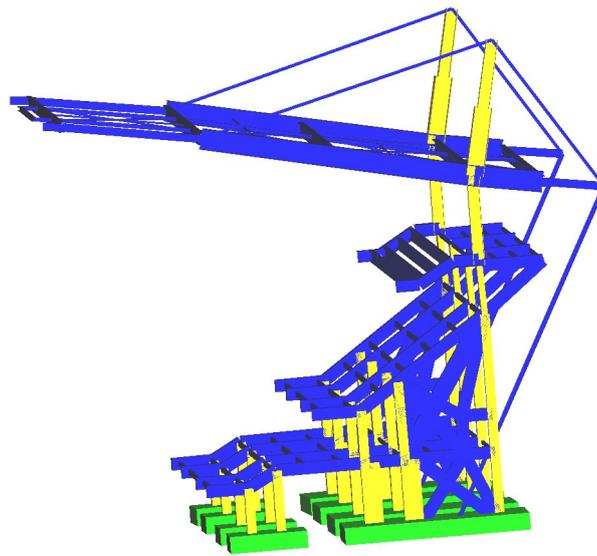


Figura 6.27. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: involucro del momento flettente [kNm]

N.B. Il simbolo della *bandierina* evidenzia gli elementi più sollecitati della struttura.

- Output del modello *Blocco 120-03*:



SFORZO NORMALE
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kN]

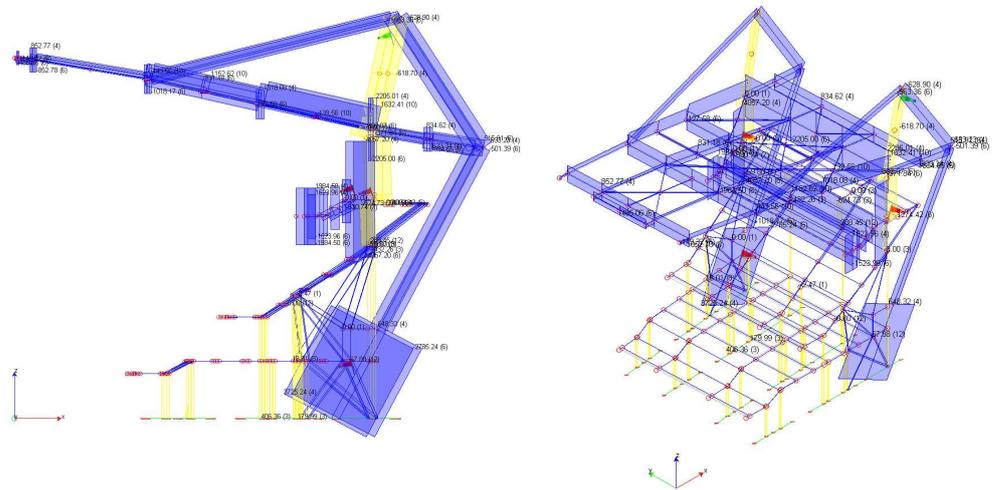


Figura 6.28. Involuppo dello sforzo normale

TAGLIO
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kN]

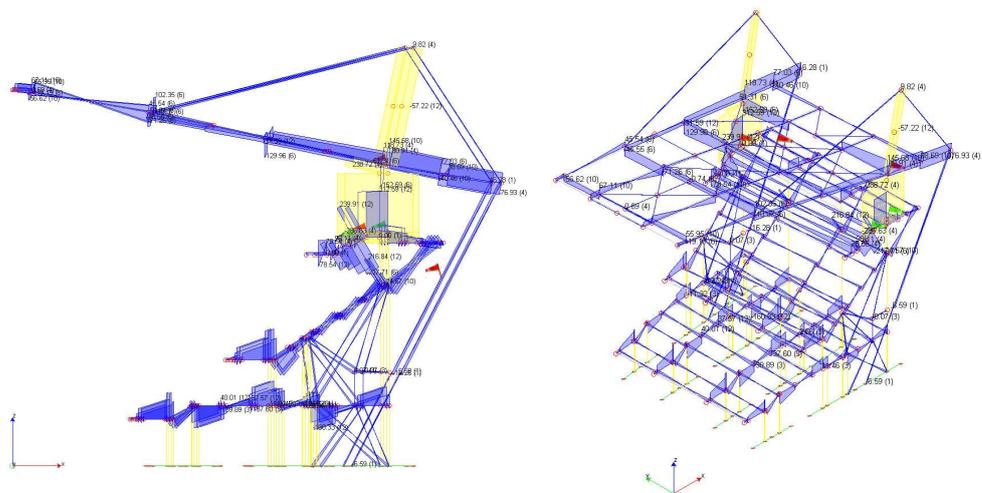


Figura 6.29. Involuppo del taglio

MOMENTO FLETTENTE
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kNm]

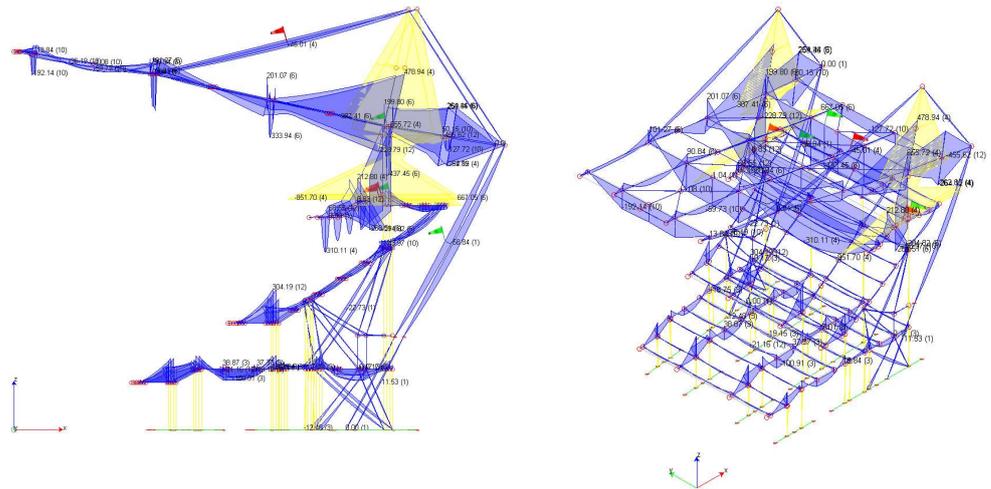
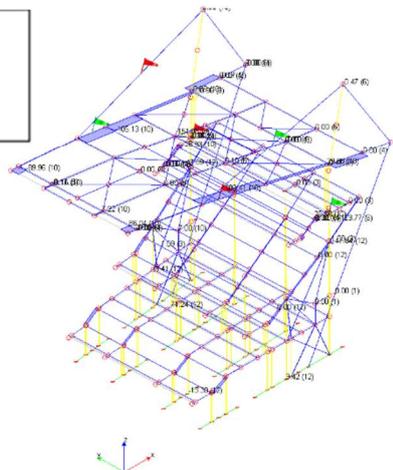


Figura 6.30. Involuppo dei momenti

TAGLIO nel piano 1-3
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kN]



MOMENTO 1-3
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kNm]

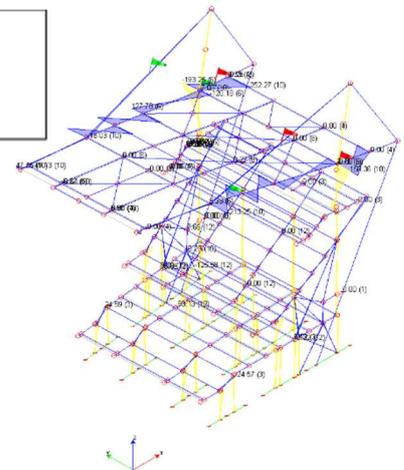


Figura 6.31. Involuppo di taglio e momenti nel piano 1-3

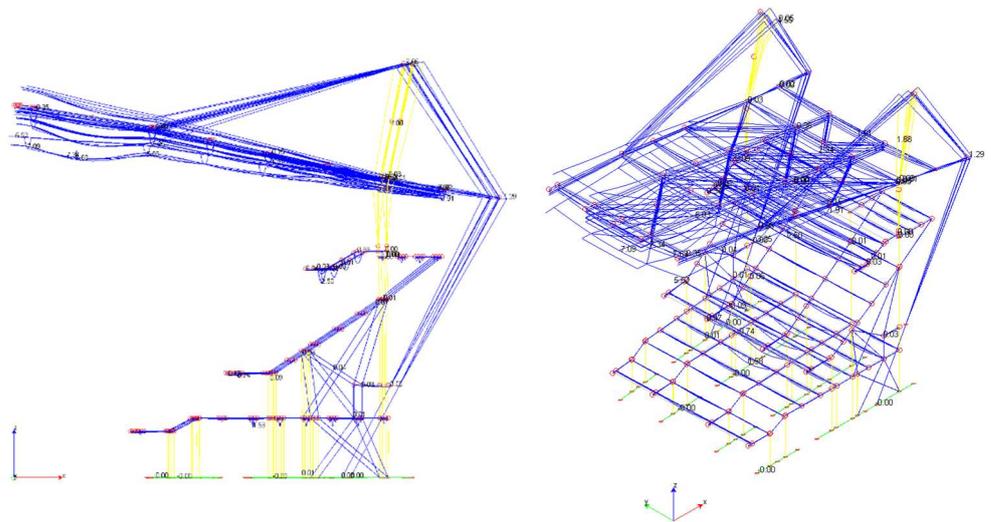


Figura 6.32. Involuppo delle deformate [cm]

Componente	Valori Min			Valori Max			Valori [Max]		
	Comb	Nodo	Valore	Comb	Nodo	Valore	Comb	Nodo	Valore
Ux	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	76	-1,75 [cm]	4 Pp+permanenti+folla+DTunif.	77	1,98 [cm]	4 Pp+permanenti+folla+DTunif.	77	1,98 [cm]
Uy	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	77	-4,69 [cm]	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	76	2,45 [cm]	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	77	-4,69 [cm]
Uz	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	75	-7,03 [cm]	4 Pp+permanenti+folla+DTunif.	934	3,25 [cm]	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	75	-7,03 [cm]
Rx	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	933	-0,27 [t]	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	77	0,52 [t]	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	77	0,52 [t]
Ry	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	924	-0,28 [t]	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	931	0,18 [t]	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	924	-0,28 [t]
Rz	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	69	-0,24 [t]	6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif.	71	0,01 [t]	10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr.	69	-0,24 [t]

Comb.	Min												Max											
	Ux [cm]	Uy [cm]	Uz [cm]	Rx [°]	Ry [°]	Rz [°]	Ux [cm]	Uy [cm]	Uz [cm]	Rx [°]	Ry [°]	Rz [°]	Ux [cm]	Uy [cm]	Uz [cm]	Rx [°]	Ry [°]	Rz [°]						
1 Peso proprio	-0.09	75	-0.53	77	-1.15	75	-0.04	69	-0.04	912	-0.00	72	0.03	77	0.53	76	-0.00	668	0.04	70	0.10	64	0.00	71
2 Pp+permanenti	-0.01	75	-0.70	77	-1.66	75	-0.06	933	-0.06	804	-0.00	72	0.29	77	0.80	76	-0.00	668	0.06	932	0.10	64	0.00	71
3 Pp+permanenti+folla	-0.04	75	-0.70	77	-1.66	75	-0.06	933	-0.09	804	-0.00	72	0.25	77	0.80	76	-0.00	668	0.06	932	0.10	64	0.00	71
4 Pp+permanenti+folla+DTunif+	-0.00	705	-0.72	77	-1.05	901	-0.09	933	-0.09	804	-0.00	72	1.98	77	0.83	76	3.25	934	0.09	928	0.17	931	0.00	75
5 Pp+permanenti+Squilibrio+folla+DTunif+	-0.00	705	-0.72	77	-1.05	901	-0.09	933	-0.09	804	-0.00	72	1.98	77	0.83	76	3.25	934	0.09	928	0.17	931	0.00	75
6 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+DTunif+	-1.75	76	-2.53	77	-7.03	73	-0.24	933	-0.28	924	-0.00	72	0.01	850	2.43	76	0.38	903	0.25	932	0.10	64	0.01	71
7 Pp+permanenti+Squilibrio+folla+neve50%+passerella	-0.14	75	-1.66	77	-3.28	75	-0.18	933	-0.13	924	-0.00	72	0.22	77	1.48	76	-0.00	668	0.18	932	0.10	64	0.00	71
8 Pp+permanenti+Squilibrio+vento dir X	-0.01	75	-0.70	77	-1.66	75	-0.06	933	-0.06	804	-0.00	72	0.29	77	0.80	76	-0.00	668	0.06	932	0.10	64	0.00	71
9 Pp+permanenti+Squilibrio+vento dir -X	-0.01	75	-0.70	77	-1.66	75	-0.06	933	-0.06	804	-0.00	72	0.29	77	0.80	76	-0.00	668	0.06	932	0.10	64	0.00	71
10 Pp+permanenti+Squilibrio+neve+vento70%+DTincr	-0.24	75	-4.69	77	-4.64	75	-0.27	933	-0.21	924	-0.24	69	0.48	77	0.73	73	0.04	903	0.52	77	0.18	931	0.00	71
11 Pp+permanenti+Squilibrio+follaianello+vento70%dir X	-0.01	75	-0.70	77	-1.66	75	-0.06	933	-0.06	804	-0.00	72	0.29	77	0.80	76	-0.00	668	0.06	932	0.10	64	0.00	71
12 Pp+permanenti+Squilibrio+follaianello+neve50%+vento50%+DTincr	-0.17	75	-3.85	77	-3.17	75	-0.17	933	-0.13	924	-0.24	69	0.46	77	0.32	73	0.04	903	0.46	77	0.13	77	0.00	71

Figura 6.33. Spostamenti massimi assoluti

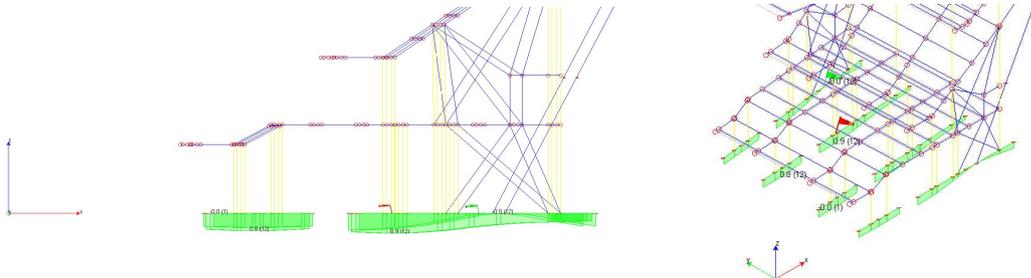


Figura 6.34. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: involucro delle pressioni sul terreno [kg/cm²]

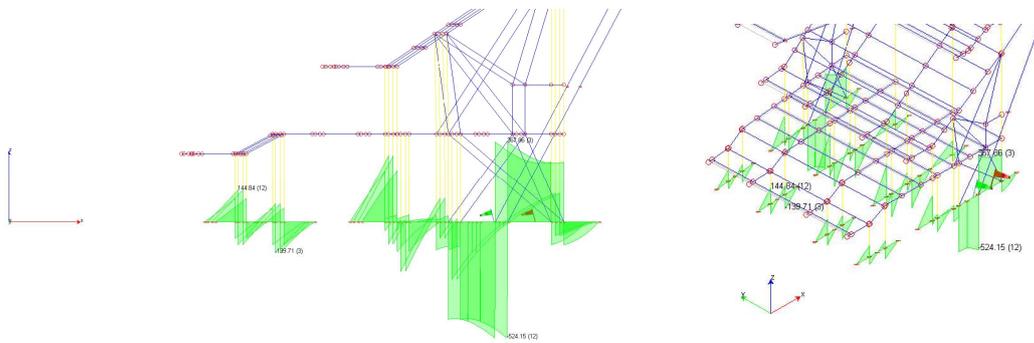


Figura 6.35. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: involucro del taglio [kN]

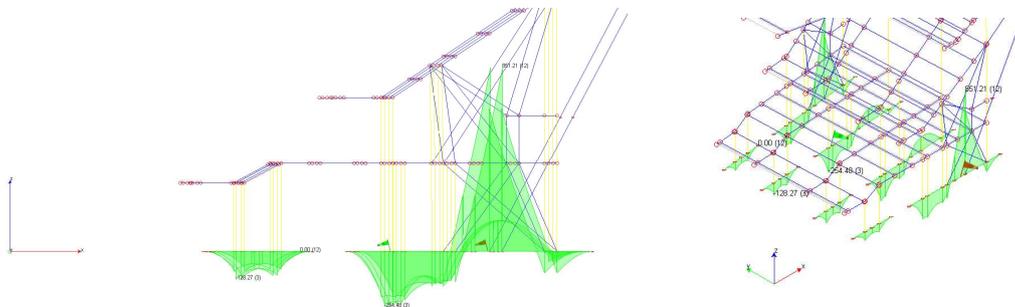


Figura 6.36. Sollecitazioni indotte sulla struttura di fondazione: involucro del momento flettente [kNm]

- Combinazione 1 (Peso proprio):

SFORZO NORMALE
 Rosso: elemento compresso
 Verde: elemento teso
 Unità di misura: [kN]

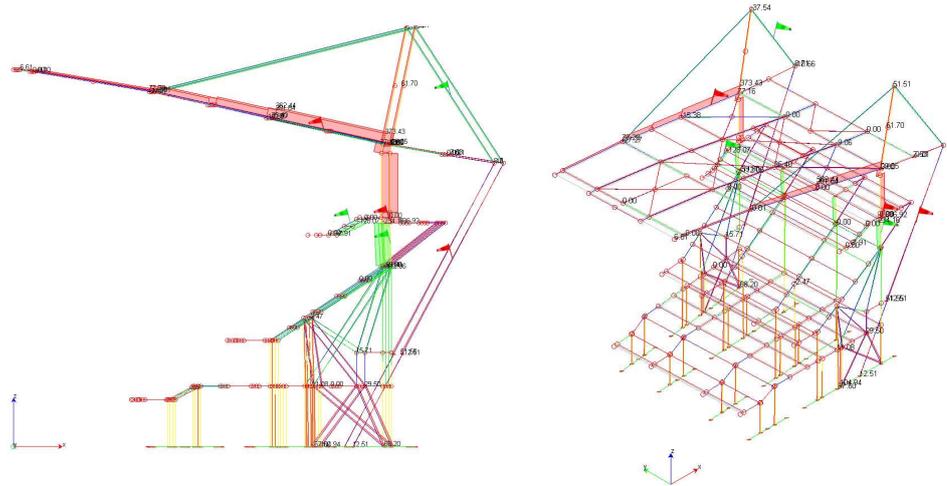


Figura 6.37. Diagramma dello sforzo normale (Comb.1)

TAGLIO
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kN]

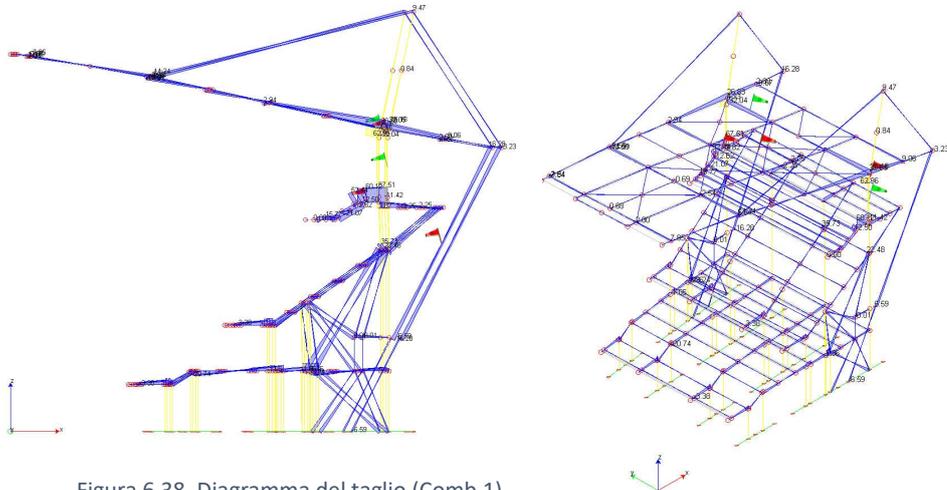


Figura 6.38. Diagramma del taglio (Comb.1)

MOMENTO FLETTENTE
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kNm]

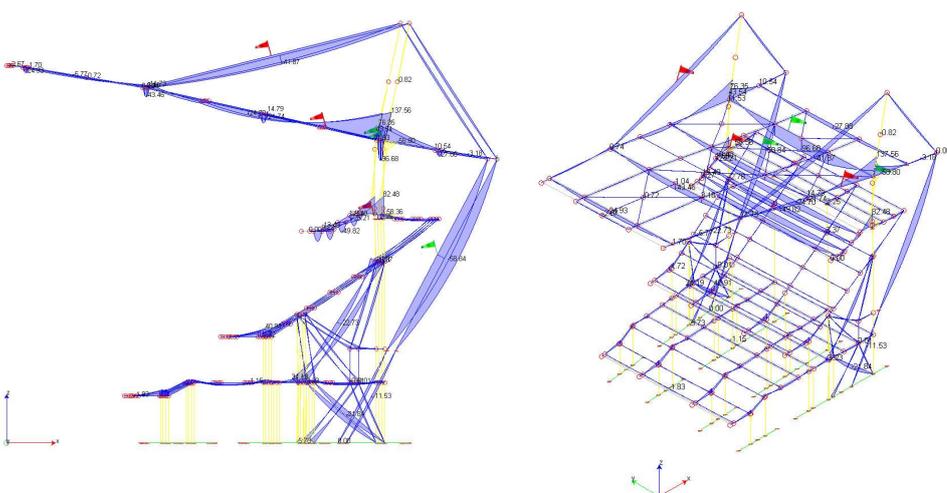


Figura 6.39. Diagramma di momento (Comb.1)

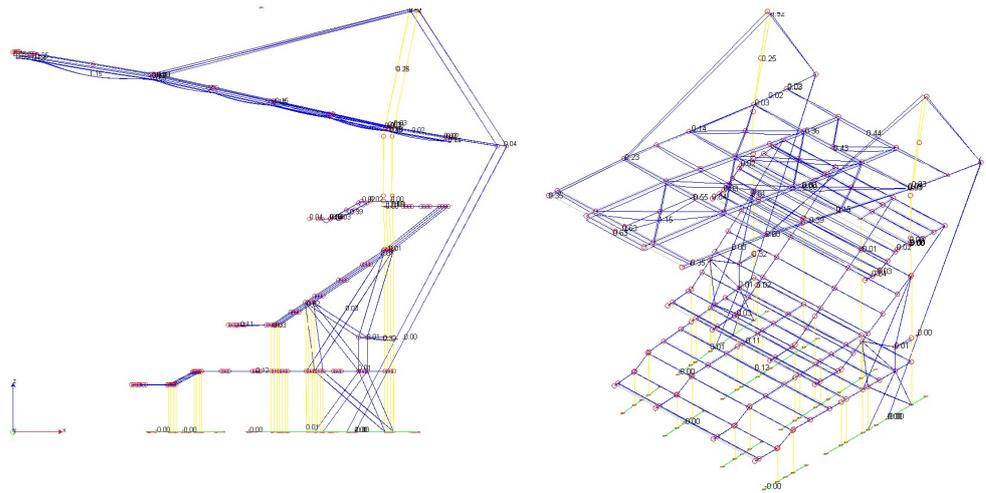


Figura 6.40. Deformata (Comb.1)

- Combinazione 4 (Peso proprio + Permanenti + Folla + ΔT_{unif}^+):

SFORZO NORMALE
 Rosso: elemento compresso
 Verde: elemento teso
 Unità di misura: [kN]

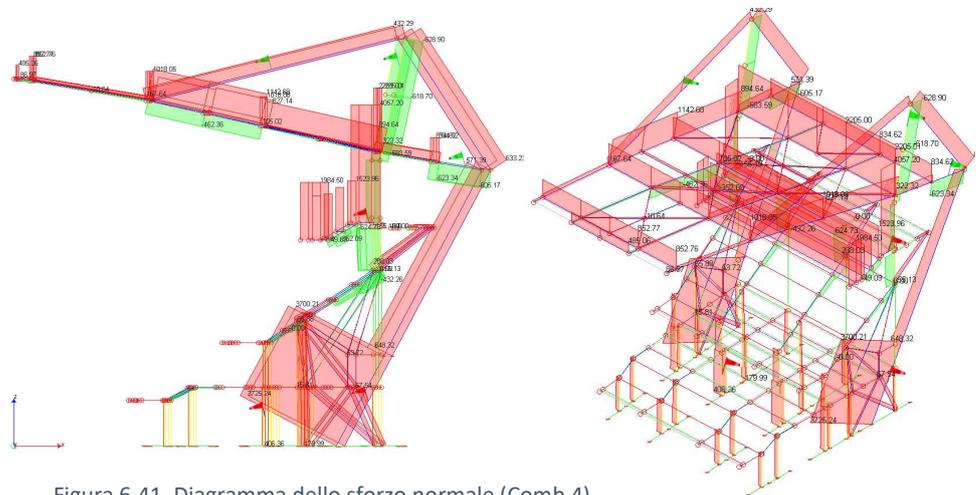


Figura 6.41. Diagramma dello sforzo normale (Comb.4)

TAGLIO
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kN]

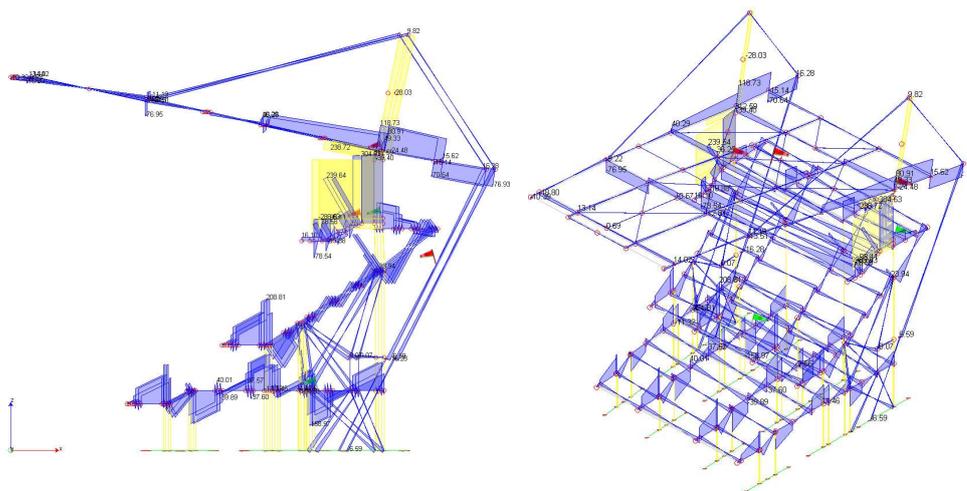


Figura 6.42. Diagramma del taglio (Comb.4)

MOMENTO FLETTENTE
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kNm]

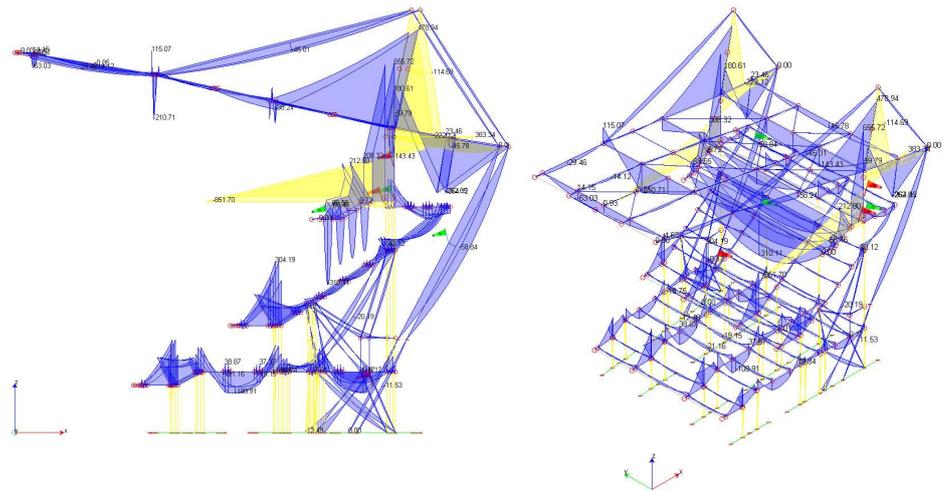


Figura 6.43. Diagramma di momento (Comb.4)

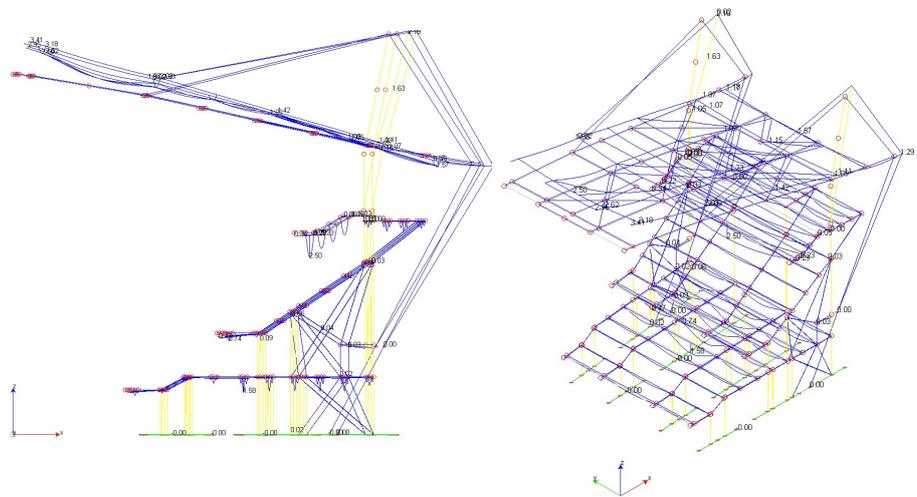


Figura 6.44. Deformata (Comb.4)

- Combinazione 7 (Peso proprio + Permanenti + Folla + 0.5 Neve + Passerella):

SFORZO NORMALE
 Rosso: elemento compresso
 Verde: elemento teso
 Unità di misura: [kN]

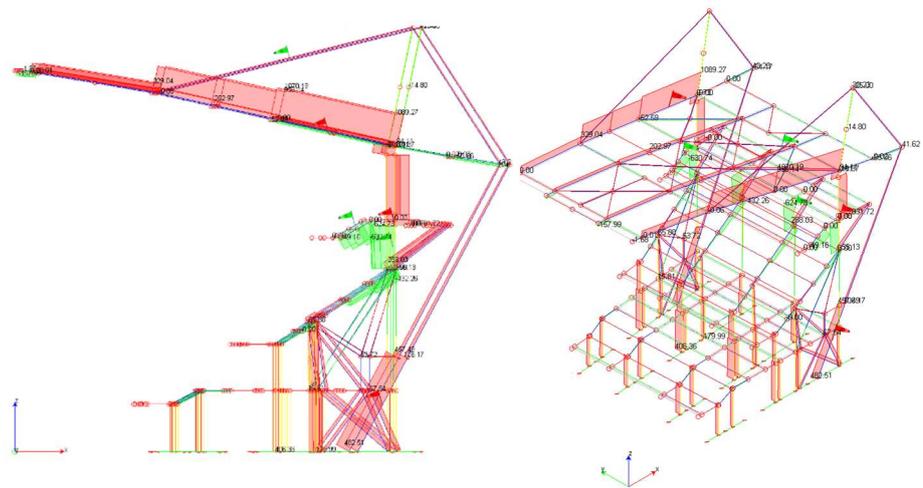


Figura 6.45. Diagramma dello sforzo normale (Comb.7)

TAGLIO
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kN]

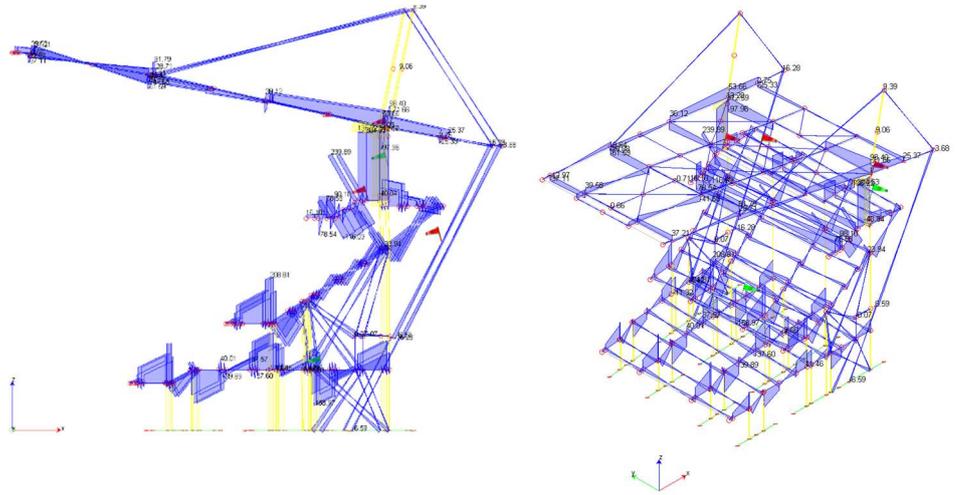


Figura 6.46. Diagramma del taglio (Comb.7)

MOMENTO FLETTENTE
 Giallo: pilastro
 Blu: trave
 Unità di misura: [kNm]

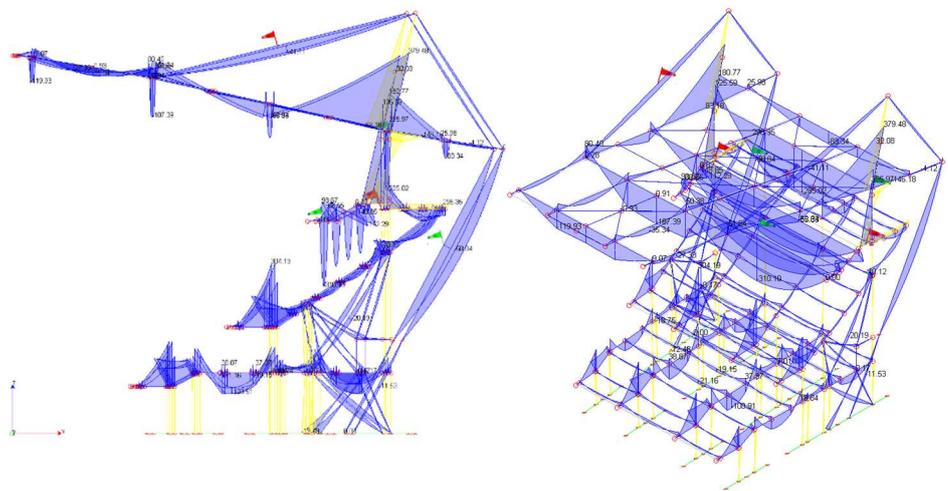


Figura 6.47. Diagramma di momento (Comb.7)

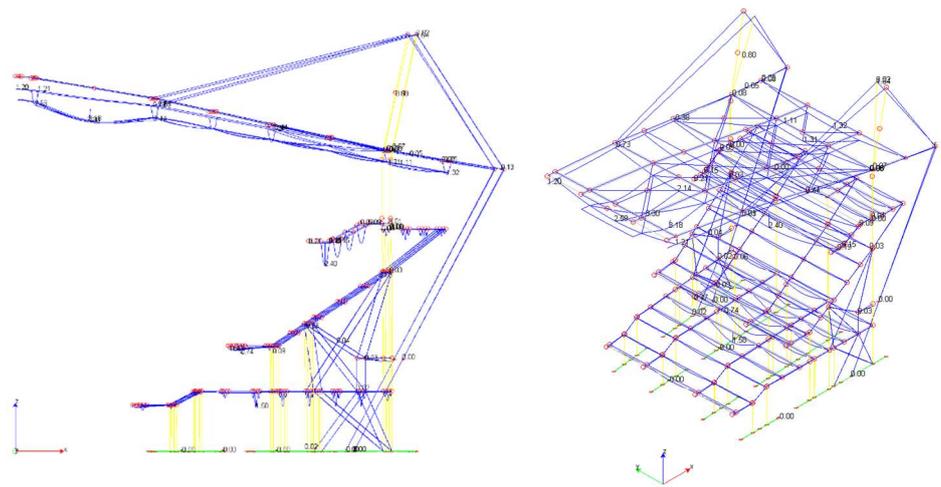


Figura 6.48. Deformata (Comb.7)

Di seguito si riportano sinteticamente i risultati dell'analisi dinamica svolta sul modello
Blocco 120-01-02-03:

MODALITA' DI VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA MODALE:	
Analisi spettrale via Subspace iterator	Valutazione dei modi di vibrare eccentrici
Smorzamento strutturale 5.0 %	Risposta S = CQC(S _i)
Via Filadelfia, 96/b, 10134 Torino TO	Tipo di Terreno C
Latitudine: 45° 02' 18.18" N	Coefficiente di amplificazione topografica (S _T) 1.0000
Longitudine: 7° 39' 0.02" E	Vita nominale della costruzione (V _N) 50.0 anni
Classe d'uso III coefficiente C _U 1.5	Classe di duttilità impostata Bassa
Comportamento dissipativo	Fattore riduttivo regolarità in altezza K _R 0.80
Fattore di struttura (SLV) 1.5	

Direzione d'ingresso	Modo Principale	Periodo [sec]	% Massa Modale Modo Principale	% Massa Modale Totale
0.00 [°] +	1	0.06	40.0	100.0
0.00 [°] -	1	0.06	40.5	100.0
90.00 [°] +	1	0.23	58.6	100.0
90.00 [°] -	1	0.23	58.9	100.0

1. Direzione di ingresso: 90° (Y)

- PVR=10, TR=712 anni
- S_s 1.500
- T_B 0.15 [sec]
- T_C 0.45 [sec]
- T_D 1.86 [sec]
- a_g/g 0.0640
- F_o 2.7836
- T_C* 0.2811

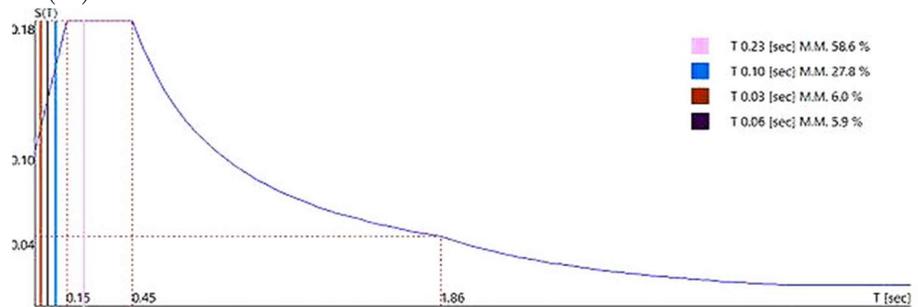


Figura 6.49. Spettro di progetto allo SLV (componente orizzontale) e periodi dei modi principali (Y)

Modo	Periodo [sec]	R	% L _i / L ₁	Massa Modale Traslante		Massa Modale Rotazionale	
				% M _{mi} /M _{mtot}	% Σ M _{mi} /M _{mtot}	% M _{mi} /M _{mtot}	% Σ M _{mi} /M _{mtot}
1	0.23	0.178		58.6	58.6	0.3	0.3
2	0.10	0.151	68.8	27.8	86.4	0.0	0.3
3	0.03	0.112	31.9	6.0	92.3	0.0	0.3
4	0.06	0.131	31.8	5.9	98.3	0.4	0.8
5	0.02	0.105	9.6	0.5	98.8	0.8	1.6
6	0.09	0.144	7.8	0.4	99.2	3.0	4.6
7	0.03	0.111	7.4	0.3	99.5	0.0	4.6
8	0.06	0.131	5.5	0.2	99.7	0.0	4.6
9	0.01	0.101	4.4	0.1	99.8	0.0	4.6
10	0.03	0.113	3.7	0.1	99.9	0.0	4.6
11	0.01	0.099	3.6	0.1	99.9	0.0	4.6
12	0.02	0.107	2.1	0.0	100.0	0.4	5.0
13	0.05	0.122	1.6	0.0	100.0	15.9	20.9
14	0.02	0.107	0.9	0.0	100.0	14.9	35.8
15	0.03	0.113	0.9	0.0	100.0	11.5	47.3
16	0.01	0.100	0.2	0.0	100.0	0.0	47.3
17	0.00	0.098	0.1	0.0	100.0	0.8	48.1
18	0.00	0.098	0.1	0.0	100.0	0.7	48.7
19	0.01	0.104	0.1	0.0	100.0	7.7	56.4
20	0.00	0.098	0.1	0.0	100.0	0.0	56.4
21	0.01	0.104	0.0	0.0	100.0	0.0	56.4
22	0.34	0.178	0.0	0.0	100.0	0.0	56.4

Figura 6.50. Autovalori, periodi, masse efficaci (Risultati Sisma 90°)

R	ordinata dello spettro
Coeff.di Part.	coefficienti di partecipazione (in letteratura g)
$ L_i/L_1 $	rapporto percentuale fra i fattori di partecipazione del modo i-esimo e del primo modo
Mmi/Mmtot	percentuale massa modale efficace dell'i-esimo modo
Sum Mmi/Mmtot	percentuale cumulativa delle masse modali efficaci



Struttura indeformata

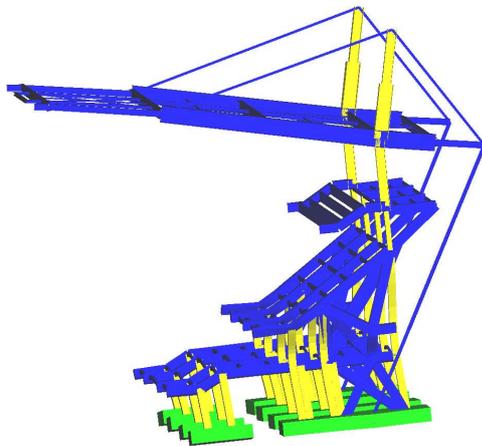


Figura 6.51. Forma modale 1 - Y

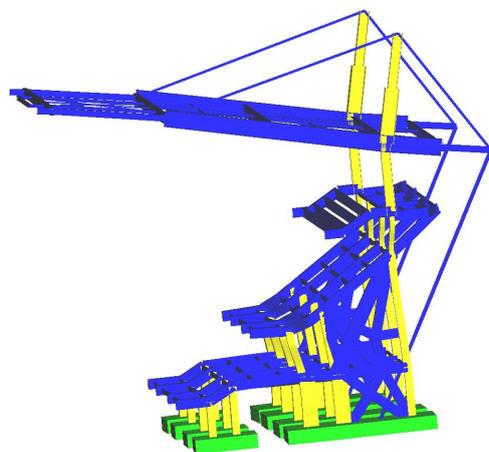


Figura 6.52. Forma modale 2 - Y

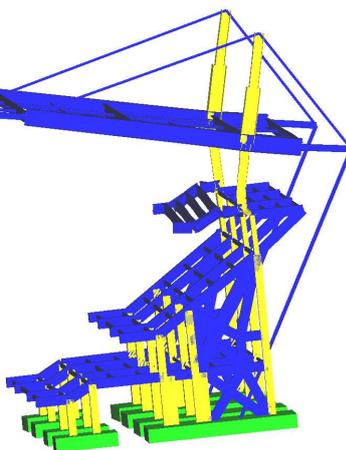


Figura 6.53. Forma modale 3 - Y

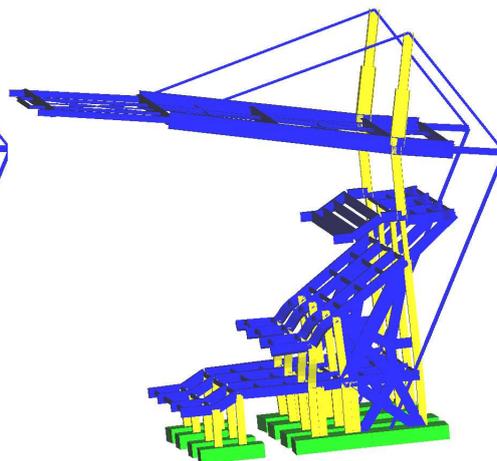


Figura 6.54. Forma modale 4 - Y

2. Direzione di ingresso: 0° (X)

- PVR=10, TR=712 anni
- S_s 1.500
- T_B 0.15 [sec]
- T_C 0.45 [sec]
- T_D 1.86 [sec]
- a_g/g 0.0640
- F_o 2.7836
- T_C^* 0.2811

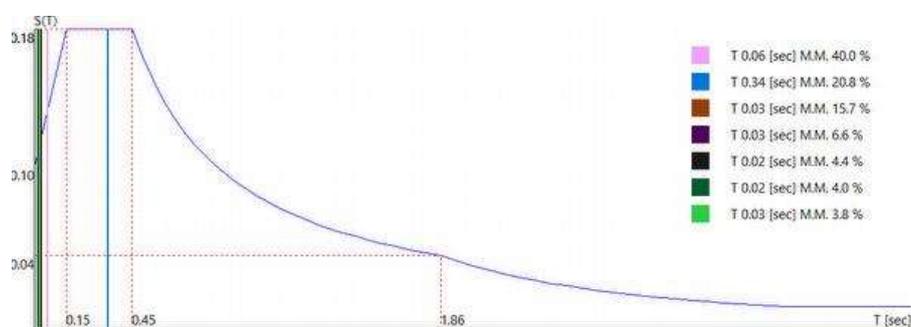


Figura 6.55. Spettro di progetto allo SLV (componente orizzontale) e periodi dei modi principali (X)

Modo	Periodo [sec]	R	% L _i / L ₁	Massa Modale Traslante		Massa Modale Rotazionale	
				% M _{mi} /M _{mtot}	% Σ M _{mi} /M _{mtot}	% M _{mi} /M _{mtot}	% Σ M _{mi} /M _{mtot}
1	0.06	0.132		40.0	40.0	1.0	1.0
2	0.34	0.178	72.1	20.8	60.8	0.3	1.3
3	0.03	0.114	62.6	15.7	76.5	4.8	6.0
4	0.03	0.112	40.7	6.6	83.1	7.0	13.1
5	0.02	0.107	33.0	4.4	87.5	9.6	22.7
6	0.02	0.106	31.6	4.0	91.5	5.8	28.5
7	0.03	0.111	31.0	3.8	95.3	0.0	28.5
8	0.06	0.131	20.4	1.7	97.0	0.1	28.5
9	0.03	0.112	19.0	1.4	98.4	0.1	28.6
10	0.05	0.122	14.5	0.8	99.3	15.7	44.4
11	0.09	0.143	10.7	0.5	99.7	2.6	47.0
12	0.23	0.178	5.3	0.1	99.8	0.0	47.0
13	0.10	0.152	4.8	0.1	99.9	0.0	47.0
14	0.02	0.105	3.0	0.0	100.0	0.8	47.8
15	0.01	0.100	2.8	0.0	100.0	0.0	47.9
16	0.00	0.099	1.8	0.0	100.0	0.1	47.9
17	0.02	0.105	0.6	0.0	100.0	3.9	51.8
18	0.01	0.103	0.4	0.0	100.0	3.9	55.7
19	0.00	0.098	0.3	0.0	100.0	0.6	56.4
20	0.01	0.099	0.2	0.0	100.0	0.0	56.4
21	0.00	0.098	0.2	0.0	100.0	0.8	57.2
22	0.01	0.101	0.0	0.0	100.0	0.0	57.2

R	ordinata dello spettro
Coeff. di Part.	coefficienti di partecipazione (in letteratura g.)
L _i / L ₁	rapporto percentuale fra i fattori di partecipazione del modo i-esimo e del primo modo
M _{mi} /M _{mtot}	percentuale massa modale efficace dell'i-esimo modo
Sum M _{mi} /M _{mtot}	percentuale cumulativa delle masse modali efficaci

Figura 6.56. Autovalori, periodi, masse efficaci (Risultati Sisma 0°)



Struttura indeformata

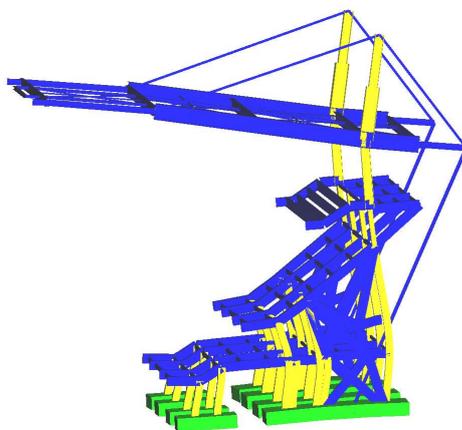


Figura 6.57. Forma modale 1 - X

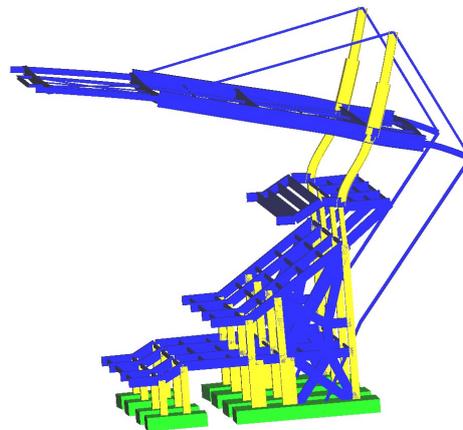


Figura 6.58. Forma modale 2 - X
Modo X della copertura

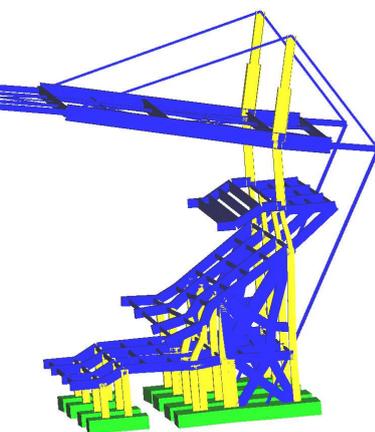


Figura 6.59. Forma modale 3 - X

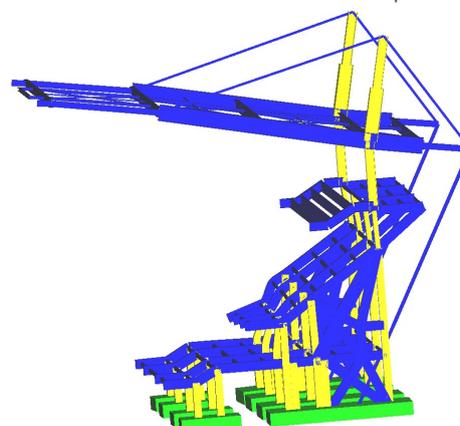


Figura 6.60. Forma modale 4 - X

6.2.1 Caratteristiche generali del sistema di monitoraggio

In questo paragrafo vengono fornite le caratteristiche generali del sistema di monitoraggio in pianificazione. Si tratta di un sistema innovativo in fibra ottica concepito su misura per lo stadio Olimpico e che risponde alle esigenze evidenziate e alle sue complessità grazie al concept BIM-based.

Il monitoraggio studiato è di tipo:

- globale;
- dinamico;
- permanente.

Gli obiettivi generali del sistema sono la conoscenza della struttura e del suo stato di salute, la ricerca di meccanismi di degrado in atto e la valutazione del tasso di lavoro dei membri strutturali durante gli eventi pubblici.

L'analisi preliminare basata sul modello strutturale e l'analisi storico-critica della struttura consentono di fissare le grandezze significative da monitorare: i parametri modali, deformazioni, vibrazioni e tensioni.

La rete di sensori definita mira a garantire tutte le informazioni necessaria al modello interpretativo per la conoscenza strutturale e la sorveglianza dello stato di salute dell'organismo.

Catena di misura

Per quanto riguarda la configurazione del sistema, è necessario impostare tutte le caratteristiche della catena di misura, settando in linea generale i parametri della stessa.

Il listino prezzi consultato è della azienda *HBM Company*; le tecnologie innovative si ispirano alla *NTSG S.r.l.*

La componentistica del sistema prevede:

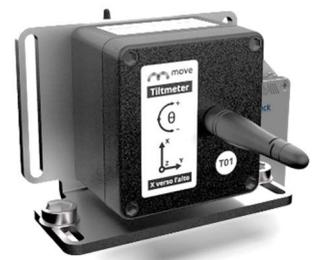
- **sensoristica:**

la rete di misura è ibrida, composta da sensori puntuali wireless e sensori distribuiti in fibra ottica.

I sensori puntuali vengono collocati in corrispondenza degli elementi più sollecitati e dei punti critici al fine di aumentare la ridondanza della rilevazione e disporre di misure di controllo locali. Si distinguono 2 tipologie:

- o Inclinometri: sensori per la valutazione dell'inclinazione da collocarsi in copertura, per il monitoraggio del comportamento globale della reticolare di copertura e come garanzia di ridondanza nella valutazione della condizione di tale corpo.

- Numero: 10 Prezzo: 1.000 € cad.
- Tipologia: Wireless Tiltmeter
- Specifiche tecniche: sensore di inclinazione a tre assi preciso e stabile. Frequenze di campionamento variabili e configurabili in remoto, design robusto e una durata della batteria fino a 8 anni rendono. È possibile calcolare la deflessione della



struttura rispetto a una linea di base. Monta inoltre un sensore di temperatura per correlare l'escursione termica e la deformazione statica. La risoluzione è di $0,000015^\circ$ ($0,00027\text{mm/m}$), ripetibilità di $\pm 0,0005^\circ$ ($\pm 0,009\text{mm/m}$) e range $\pm 90^\circ$.

- Celle di carico: sensori per la valutazione della tesatura degli stralli, da collocarsi in corrispondenza degli stralli (tirante Macalloy, tondo 50 – strallo St3 Retro tribune).

- Numero: 40 Prezzo: 1.500 € cad.
- Tipologia: Celle di carico estensimetriche
- Specifiche tecniche: misuratore di forza a trazione e compressione a un'estremità di attuatori, tiranti, funi, snodi, ganci. L'innovativo principio di misura meccanico consente di accettare alti sovraccarichi (con forze statiche a compressione allineate lungo l'asse di misura e con serraggio delle filettature fino alla battuta). Possibilità di lavoro in presenza di polveri, sporcizia e umidità (protezione ambientale IP65). Campo di misura da 10 a 100 tonnellate.



I sensori wireless trasmettono letture accurate dal sito tramite il protocollo di comunicazione wireless LoRaWAN tramite un gateway:

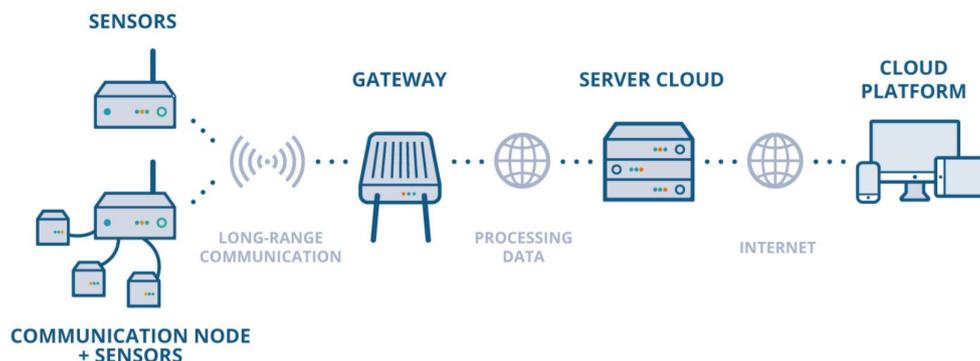


Figura 6.61. Funzionamento del sistema wireless (Fonte: MOVE Solutions)

- Gateway: unità di controllo per la ricezione e l'invio di dati

- Numero: 4 (16 canali ciascuno)
- Tipologia: Gateway SHM
- Specifiche tecniche: con tale unità, grazie al protocollo di comunicazione ad ampio raggio LoRaWAN, è possibile gestire e comunicare con decine di dispositivi e sensori contemporaneamente. Questo dispositivo, innanzitutto, riceve le informazioni trasmesse dai molteplici sensori installati tramite LoRaWAN. Quindi, utilizzando la connettività cellulare, inoltra questi dati ai server online.

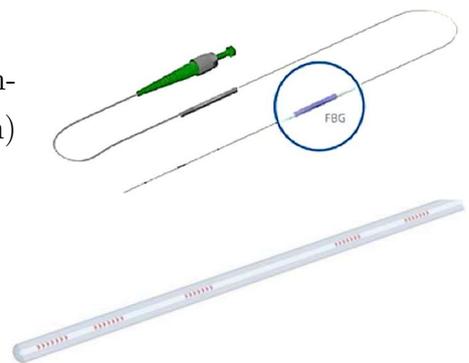


Il cuore della catena di misura è rappresentato dal sistema in fibra ottica, innovativo e dalle notevoli potenzialità, cucito su misura sullo stadio Olimpico: le sue finalità sono il controllo dei livelli di vibrazione e l'identificazione dinamica. Questo è garantito dalla

completa mappatura della struttura, in cui la fibra ottica costituisce il sistema nervoso. La rete ottica di rilevazione per il monitoraggio strutturale consta di sensori in fibra ottica monomodale distribuiti, collocati in accordo all'analisi strutturale in modo tale da rilevare tutte le informazioni necessarie per ricostruire il comportamento strutturale e la condizione di salute, riuscendo ad analizzare completamente la struttura grazie alle proprietà della fibra ottica. Altre caratteristiche del sistema ottico sono: longevità (più di 30 anni), possibilità di collocare lo strumento di acquisizione dati a grande distanza (km) dalla zona di monitoraggio, senza ridurre la precisione della misura, misura continua per lunghi tratti di fibra ottica, scambio dati attraverso trasmissione di segnali luminosi all'interno della fibra con coefficiente di usura ridotto. In particolare, sono previste 2 tipologie di catena di misura ottica, basate su 2 differenti tecnologie delle fibre ottiche sensing: semi-distribuita e distribuita. Le due tecniche di misura ottica possono essere persino integrate nella stessa dorsale di fibra.

○ Tecnologia distribuita:

seniore ottico distribuito per la misura diretta continua (passo 5 cm per tratti di fibra fino a 80 km) di strain meccanico (deformazione) e termico (per la compensazione dell'effetto termico sulla variazione di lunghezza d'onda, dovuto alla dilatazione termica). La tecnica di base è lo scattering di Brillouin (SBS), che consente di rendere la stessa fibra nuda elemento sensibile, senza lavorazioni particolari. Nel complesso la tecnologia è anche chiamata DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensing).



- Tipologia: Array ottico di FBG configurabile
- Specifiche tecniche: Elementi sensore di deformazione a fibra con griglia di Bragg (FBG) su una fibra nuda con un mantello ad alte prestazioni. In sintesi, fibra nuda con FBG multipli.



○ Tecnologia semi-distribuita:

seniore ottico semi-distribuito per la misura indiretta di accelerazioni e spostamenti, finalizzata all'identificazione dinamica e al controllo dei livelli di vibrazione e deflessione. Si parla di misura indiretta in quanto la rilevazione viene eseguita da uno specifico strumento (propriamente sensore in tal caso: accelerometri e trasduttori di spostamento), anch'esso in fibra ottica, mentre la fibra è usata per cablaggio in serie di sensori e trasmissione dati; fino a 160 sensori, anche di grandezze diverse, possono essere cablati in serie sulla stessa fibra grazie alla tecnologia FBG. Tramite laser UV, si iscrive il reticolo nel core della fibra: il reticolo è il sensore. Complessivamente si

ottengono sensori a reticolo di Bragg (FBG) multiplexing, ossia basati su fibra con griglia di Bragg.

I sensori ottici da collegare risultano:

Accelerometri:

- Prezzo: 650 €
- Tipologia: Accelerometro per asse singolo
- Specifiche tecniche: trasduttore basato su fibra con griglia di Bragg per le misurazioni dell'accelerazione di assi singoli applicabile con avvitatura. Impiego interno/esterno. Campo operativo di ± 10 g, sino a 50 Hz. Cavo blindato $\varnothing 3$ mm di 2 m di lunghezza su ciascun lato terminato con connettori FC/APC. Da collocarsi in terne, per misure triassiali.



Trasduttori di spostamento:

- Prezzo: 1.500 €
- Tipologia: Trasduttore ottico di spostamento
- Specifiche tecniche: trasduttore basato su fibra con griglia di Bragg per misurare lo spostamento lineare. Campo di misura di 650 mm, cavo blindato $\varnothing 3$ mm di 2 m di lunghezza su ciascun lato terminato con connettori FC/APC.



La configurazione di una serie di sensori sfrutta la capacità di multiplexing intrinseca della fibra di Bragg. Il collegamento in serie non compromette la corretta lettura delle misurazioni a patto che i segnali dei sensori non si sovrappongano. I sensori possono essere acquisiti singolarmente, con o senza l'uso di connettori, oppure come serie preassemblate di sensori collegati tramite giunzione a fusione (un collegamento permanente tra due fibre). Al momento dell'installazione, i sensori e/o le serie possono essere collegati insieme a uno dei canali degli interrogatori ottici.

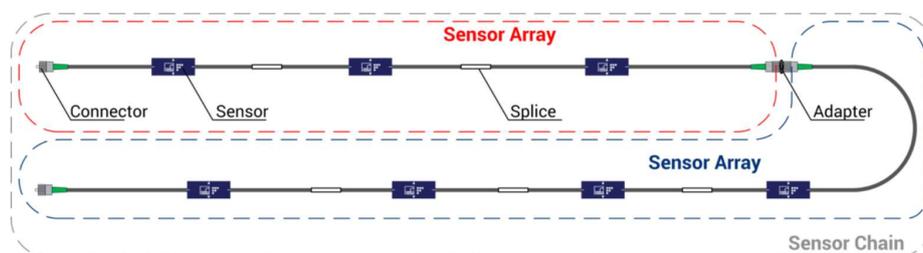


Figura 6.62. Sensori multipli assemblati in serie con connettori collegati

Gli accessori necessari per la configurazione logistica dei sensori risultano, oltre alle dorsali in fibra ottica necessari per cablare i sensori e trasmettere i dati (cavo di rete ottico da pochi euro al metro), connettori ottici (da 25€) e splitter (da 150€). In ordine:



- **centralina di acquisizione:** soluzione ibrida gestita da un unico interrogatore in grado di assolvere l'acquisizione per il sistema ottico e per i dispositivi wireless, in gradi di gestire più rami di fibra ottica contemporaneamente.

- Prezzo: 24.000€
- Tipologia: Modulo interrogatore
- Specifiche tecniche: per sensori in fibra ottica a griglia di Bragg semi-distribuita e distribuita e trasduttori wireless. Numero massimo di canali per connettore: 16; velocità di scansione selezionabili a 2 kS/s o 100 S/s.



- **software di acquisizione:**

deputato all'integrazione dei dati da sensori di tipologia differente. Deve consentire la creazione di pannelli individuali per la visualizzazione dei valori di misura e l'analisi grafica dei dati memorizzati con possibilità di esportazione del grafico. Prezzo orientativo: 4.000€.

- **software di archiviazione e gestione:**

l'archiviazione e la gestione dai dati viene concepita per essere implementata tramite processo BIM. I dati acquisiti vengono archiviati su *piattaforma Cloud*, disponibili per la gestione e il processamento da parte di software di analisi.

- **software di analisi:**

costituito dal componente logico contenente gli algoritmi matematici di identificazione dinamica e dall'applicativo per l'elaborazione dei dati del monitoraggio al fine di valutare lo stato di salute strutturale. Nello specifico, la tecnica di identificazione dinamica in esame rientra nella famiglia OMA, dato che l'input è ambientale (tra cui la folla di spettatori); si ricorre alla SSI come modello per l'identificazione dinamica.

Gestione dati

L'altro importante fronte da studiare riguarda la gestione dati. Volendo progettare un sistema efficiente, la risposta è rappresentata da una soluzione BIM-based, integrata con le informazioni in tempo reale derivanti dal sistema di monitoraggio. Nel complesso, la copia digitale

(Digital Twin) del manufatto costituisce lo strumento per la gestione ottimizzata dei dati dello SHM.

Tale scelta influenza la configurazione del sistema, che dovrà essere in grado di rispondere a tale esigenza. Il software di archiviazione e gestione dei dati dovrà essere interoperabile con la piattaforma BIM. L'organizzazione del modello digitale parametrizzato è stata così concepita:

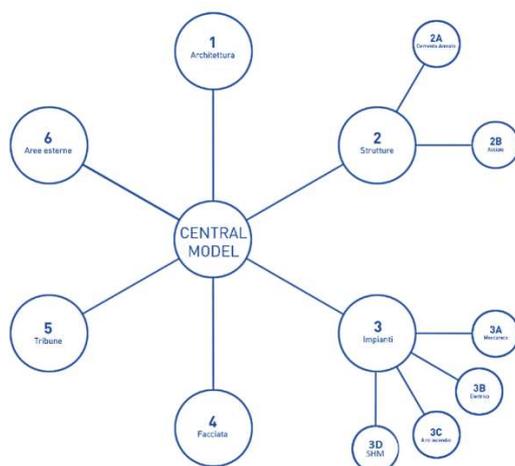


Figura 6.63. Central model e Sub-modelli di progetto

L'integrazione dei dati in tempo reale del monitoraggio al modello BIM, grazie all'inserimento dei sensori del sistema progettato come oggetti digitali nel modello parametrizzato, consentirebbe la realizzazione di un gemello digitale dello stadio Olimpico Grande Torino: l'impianto evolverebbe così alla condizione di *smart structure* in grado di effettuare autodiagnosi autonome e analisi predittive.

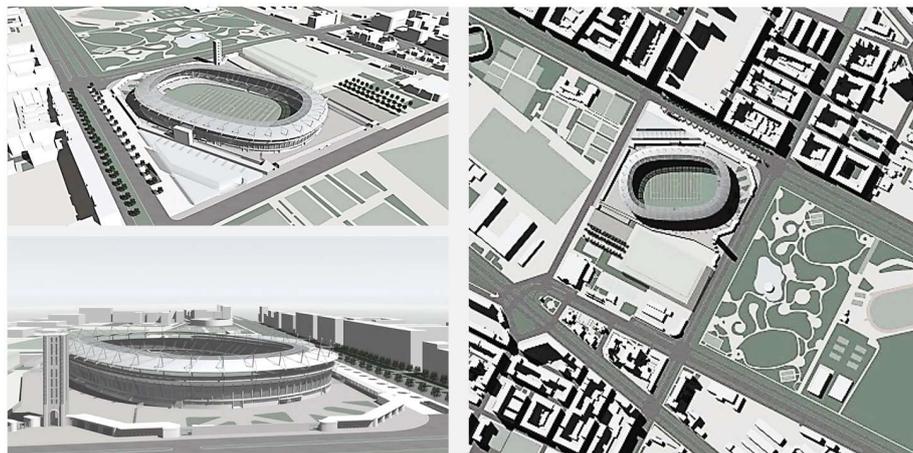


Figura 6.64. Studio di fattibilità del Digital Twin: il futuro dello stadio Olimpico

Punti di forza e obiettivi della soluzione

La soluzione proposta presenta numerosi vantaggi, i quali spiegano perché è stata concepita nella forma presentata.

Per quanto riguarda i sensori wireless, i punti di forza risultano:

- Innovazione: assenza di cablaggio per il funzionamento del sensore.

- Facilità di installazione: il sistema wireless garantisce installazione su strutture esistenti semplice e veloce, senza necessità di allacciamento;
- Efficienza e intelligenza: la trasmissione dei dati tra i sensori è senza fili, tramite la comunicazione LoRaWAN a lungo raggio ea bassa potenza.
- Velocità: la raccolta dei dati in tempo reale garantisce un monitoraggio efficiente e predittivo.

Gli aspetti sfavorevoli di questa porzione della catena di misurano risiedono in costo, necessità di batterie per l'alimentazione (seppure di durata notevole dell'ordine di anni), decadimento del segnale su distanze molto lunghe, sensibilità a disturbi e agenti atmosferici (campi elettrici).

La rete di misura con fibre ottiche sensing, invece, ha una molteplicità di punti di forza, la maggior parte propri della tecnologia ottica:

- Stessa prestazione di una soluzione tradizionale (elettrica, cablata, con 3 cavi per sensore) ma tramite un sistema che sfrutta un solo materiale per misura e trasmissione;
- Non necessita di alimentazione elettrica in corrispondenza del punto di misura;
- Riduzione dei costi del sistema di monitoraggio, essendo la fibra sia elemento sensibile che mezzo di trasmissione dei segnali;
- Modularità e versatilità: creazione di un sistema modulare di complessità variabile (da reticoli di Bragg a design complessi di sensori) con diversi formati di sensori in grado di crescere con la struttura monitorata su cui si progetta e aggiornabile nel tempo;
- Facilità d'uso: sistema compatibile con le fibre per telecomunicazione, per misure su lunga distanza, dal design robusto, senza necessità di calibrazione e senza limite di lunghezza;
- È un sistema passivo flessibile e affidabile: può essere installato in modo semplice praticamente ovunque, su elementi di ogni natura e forma, riducendo i costi di avviamento;
- Configurabilità: possibilità di scelta delle opzioni di sistema: lunghezze d'onda, cavi, connettori, numero e disposizione di FBG o sensori (tecnica distribuita o semi-distribuita), adatto a misure ibride, ottiche e convenzionali;
- Precisione di misura: sensibilità di misura e ripetibilità della misura nel tempo elevate, stabilità a lungo termine, grazie all'assenza di fenomeni di deriva del segnale dallo zero di calibrazione che rende il sistema ideale per monitoraggi lunghi;
- Immunità nei confronti di ogni tipo di ambiente, agenti atmosferici e interferenze elettromagnetiche, resistenza alle alte temperature (fino a 800°C), alla corrosione, a deformazione e fatica: applicabilità in acqua e in ambienti aggressivi, umidi, salmastri, a rischio incendio o esplosione;
- Acquisizione *real time* a frequenze elevate (sino a 1 kHz): da cui la possibilità di analisi diagnostiche in tempo reale, associabili a meccanismi di allarme;
- Sistema non invasivo e minimamente intrusivo grazie alla piccola dimensione della fibra che consente un sistema di dimensioni ridotte e leggeri, inseribile in materiali compositi;

- Un solo sistema per la misura di svariate grandezze: misura diretta (strain meccanico e termico) e misura indiretta con sensori ottici cablati in serie (carico, pressione, vibrazione, spostamento, corrosione, flusso);
- Ha capacità multiplexing: lungo la stessa fibra si possono avere numerosi punti di misura, sensori per misure differenti, interrogati in contemporanea da un unico sistema di interrogazione (fino a 160 sensori discreti con la tecnica semi-distribuita; fino a 1 milione di punti di misura distribuiti su una sola fibra di 50 km);
- Possibilità di posizionare la centralina di acquisizione a grandi distanze dalla zona di monitoraggio, senza perdite in precisione (fino a 100 km);
- Misure statiche e dinamiche con notevole riduzione dei cablaggi richiesti per il monitoraggio;
- Notevole longevità (superiore ai 30 anni) dovuta all'usura su scala secolare della fibra: ciò e la passività consentono l'abbattimento dei costi di manutenzione ordinaria del sistema. È necessaria la sola manutenzione straordinaria in caso di cedimento del materiale di supporto dei sensori, in genere e comunque sempre sulla base dei dati dei sensori;
- Sicurezza intrinseca elevata dato che non impiegano corrente elettrica, non scaldano e non producono scintille o fiamme.

Dall'altro fronte, i punti di debolezza della rete di misura riguardano la necessità di un cavo in fibra ottica che corra nel caso in cui si voglia predisporre almeno un sensore e l'installazione di ciascuno dei sensori wireless, più dispendiosa di quella per gli ottici.

Le grandi potenzialità della fibra ottica vengono testimoniate anche dal confronto con la tecnologia tradizionale:

TECNOLOGIA TRADIZIONALE	VS	TECNOLOGIA OTTICA
Sensori elettrici		Sensori ottici
Sensori attivi		Sensori passivi
Sensibilità a campi elettromagnetici		Immunità a campi elettromagnetici
Fonte di innesco		Non fonte di innesco
Decadimento del segnale su lunghe distanze		Perdita di segnale nulla
3 cavi per sensore		Fino a 160 sensori discreti su una fibra
Costi di manutenzione elevati		Fino a 1 milione di sensori distribuiti
		Costi di manutenzione ridotti

Figura 6.65. Confronto tra tecnologie: tradizionale vs ottica

Le suddette caratteristiche garantiscono il soddisfacimento degli obiettivi previsti per il sistema di misura ibrido predefinito:

- identificazione dinamica delle strutture, con misure in tempo reale e ad elevata frequenza di campionamento;
- messa in sicurezza delle strutture e degli utenti, visto lo speciale utilizzo dell'impianto;

- verifica del comportamento della struttura e validazione delle specifiche tecniche;
- monitoraggio dell'usura e dell'invecchiamento delle strutture mediante il rilevamento delle variazioni delle sue caratteristiche meccaniche e fisico-chimiche.

In sintesi, il sistema mira all'analisi dello stato di salute con esecuzione di diagnosi strutturali, garantendo grossi vantaggi economici a medio e lungo termine associati ad una manutenzione certa dell'opera ed alla garanzia della sicurezza di persone e cose.

L'implementazione della copia digitale, poi, porterebbe con sé l'opportunità di creare un mondo interconnesso con un elevato numero di elementi collegati tra loro e l'elaborazione automatica di una grande quantità di dati con conseguente grande semplificazione; sovra informazione ed errata interpretazione sono invece i rischi associati.

6.2.2 Progettazione del sistema

La seguente sezione si occupa della configurazione del sistema di monitoraggio, definendo i percorsi della fibra ottica e la collocazione dei sensori e dei vari componenti della catena di misura predefiniti. Si tratta della pianificazione logistica e fisica del sistema, svolta assumendo come riferimento rigoroso il modello strutturale e i risultati dell'analisi strutturale svolta. L'implementazione del sistema di monitoraggio viene concepita e presentata per livelli: da una macro-analisi (*a piccola scala*), fondamentale per l'inquadramento della catena di misura nel suo complesso tramite il cablaggio di sistema in corrispondenza dell'intorno delle strutture dello stadio, si passa ad una micro-analisi (*a grande scala*), mirata alla predisposizione dei sensori per ciascun componente strutturale e per ciascun settore. Infine, tale organizzazione per livelli prevede il focus sui nodi critici della struttura, esaminati e monitorati in accordo all'*analisi a scala puntuale*. Il passaggio tra i vari livelli di analisi si può paragonare all'azione di uno *zoom-out*.

La prima operazione inerente al processo di implementazione in situ del sistema di monitoraggio è associata alla scelta dei locali per la gestione logistica del sistema. A tal riguardo, è stato individuato uno spazio circoscritto da destinare a centro operativo, ossia sito per il coordinamento del complesso sistema, e questo coincide con il fabbricato tecnologico adibito a *Cabina Elettrica*, interna all'area di pertinenza dello stadio, nello specifico nell'area di servizio della curva nord, e prospiciente Corso Sebastopoli. Tale scelta è legata alla possibilità di spazi organizzativi per la sistemazione delle attrezzature e alla posizione di riguardo del manufatto, vicino allo stadio ma di rispetto in quanto locale distinto e staccato, nonché al vantaggio di avere già predisposte le necessarie linee elettriche e la possibilità di allaccio all'esistente gruppo di continuità, garanzia del funzionamento del sistema anche in eventi critici.

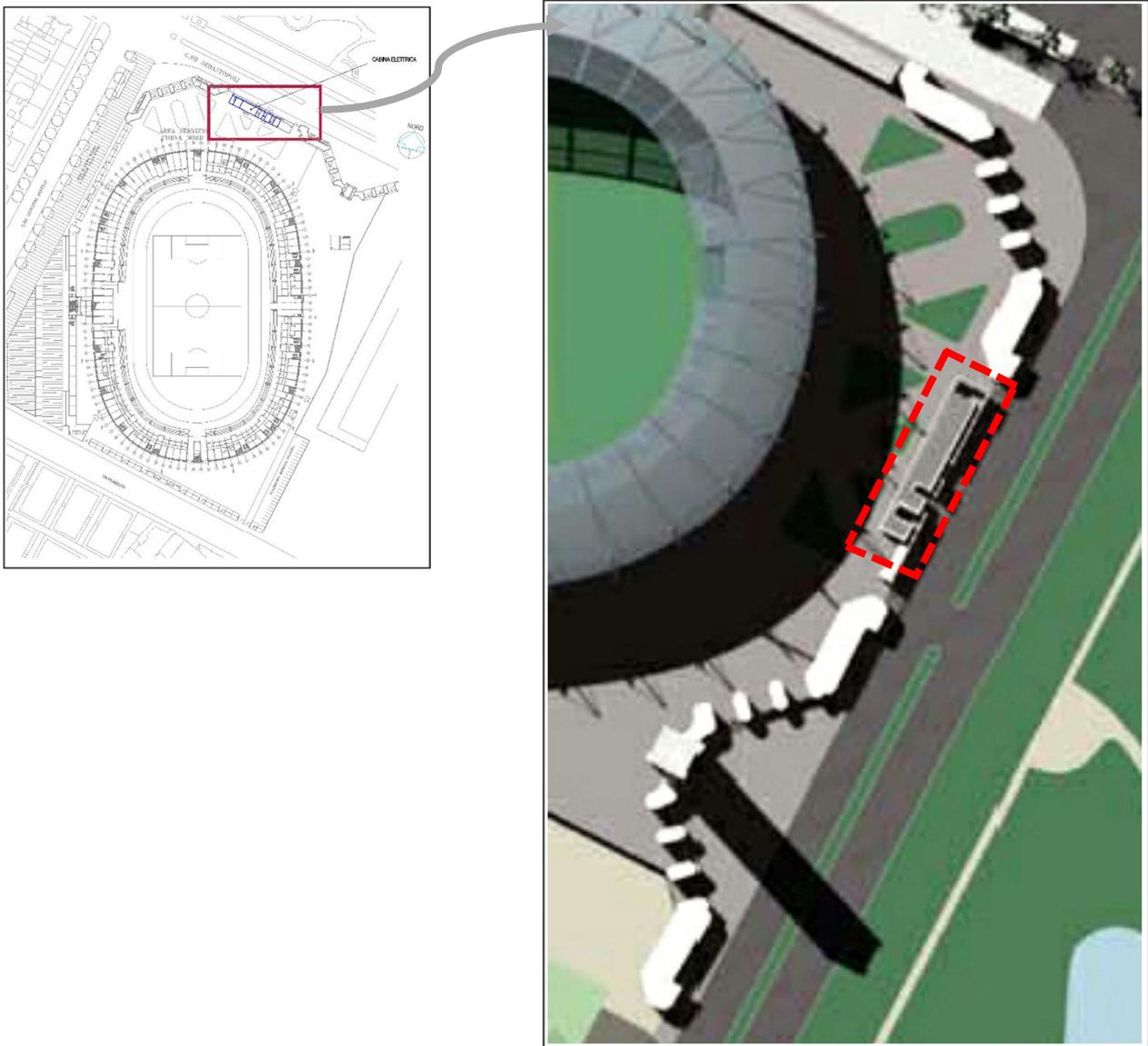


Figura 6.66. Individuazione del *Centro operativo SHM* sulle simulazioni digitali

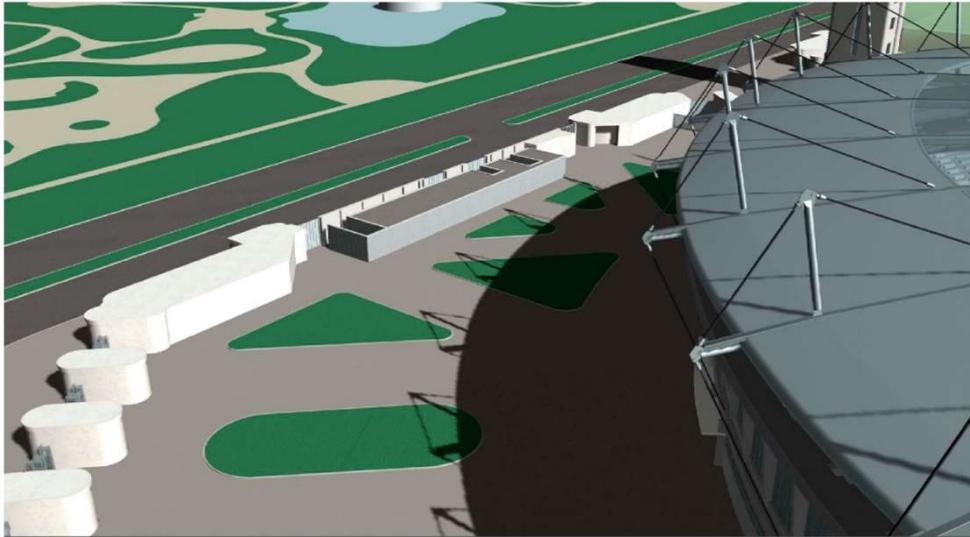


Figura 6.67. Individuazione del *Centro operativo SHM* sulle simulazioni digitali

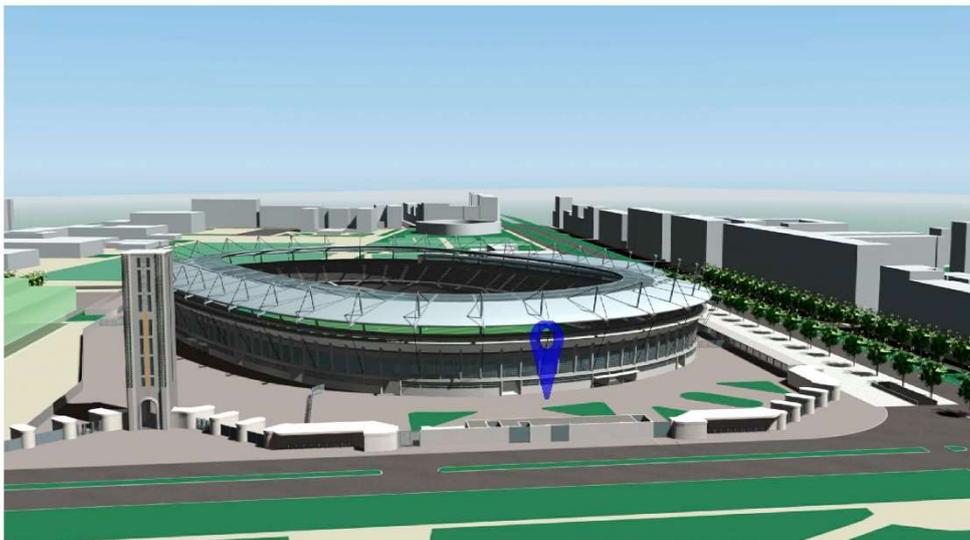


Figura 6.68. Individuazione del *Centro operativo SHM* sulle simulazioni digitali

Il fabbricato consta di diversi locali, la maggior parte dei quali ospitano attrezzature e unità elettriche. Una riorganizzazione funzionale di tali spazi, non di interesse per le componenti fondamentali di difficile trasloco, consente di ottenere lo spazio necessario per il fine suddetto. Tale riorganizzazione viene così schematizzata:

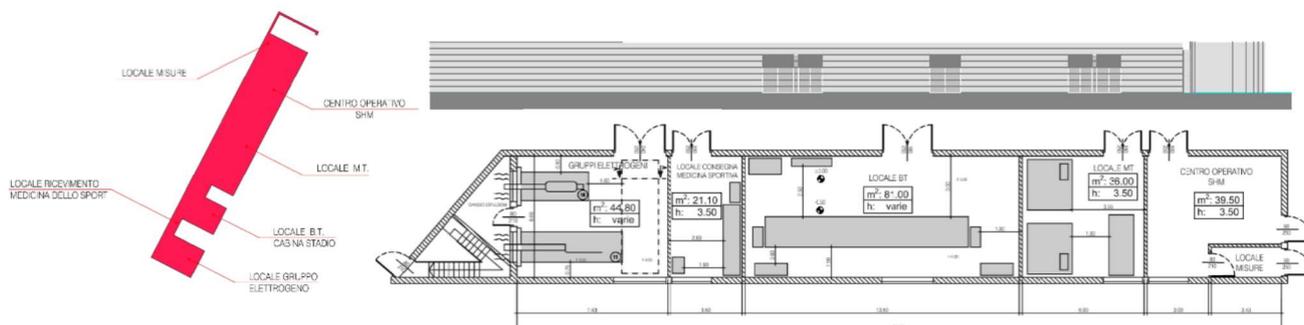
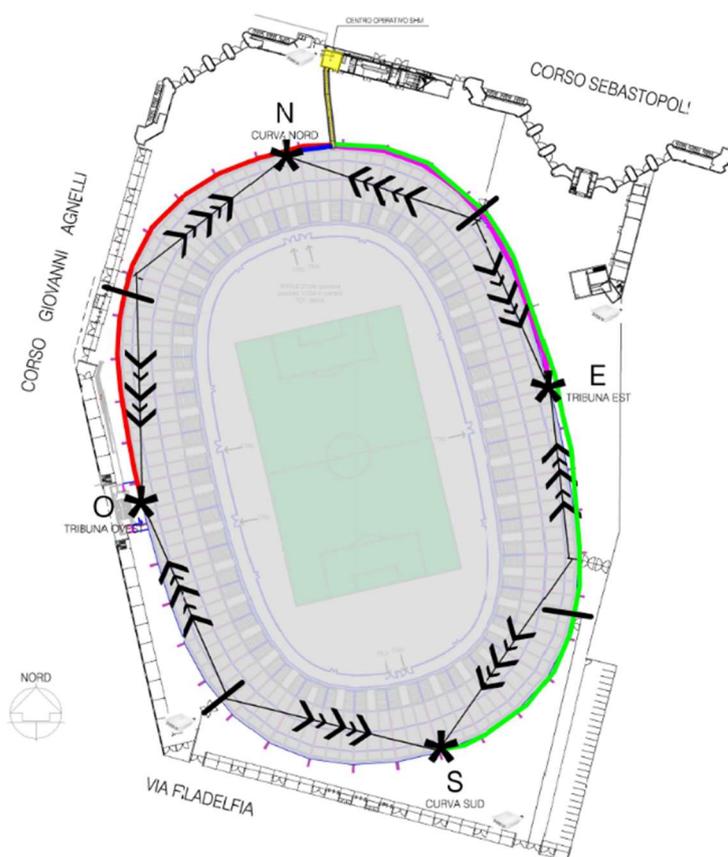


Figura 6.69. Predisposizione dei locali per SHM

A questo punto è possibile presentare la configurazione globale del sistema, concepita tenendo conto della divisione settoriale propria dello stadio, in quanto congeniale per la pianificazione del sistema. Si tratta infatti di un'organizzazione che si basa su tale macro-divisione, ossia sulla distinzione tra le 2 tribune e le 2 curve. La gestione del sistema avviene quindi per settori, definendo 4 sottosistemi. I cavi di fibra ottica sensing e i sensori associati agli elementi strutturali di ciascun settore confluiscono in un punto di raccolta cadauno, collocato in una posizione intermedia rispetto al settore; da questo punto, grazie ad un percorso cablati protetto da dossi passacavi, viene raggiunto il centro operativo SHM.

LEGENDA

- Percorso settore N
- Percorso settore O
- Percorso settore S
- Percorso settore E
- Centro operativo SHM
- *** Punto di confluenza
- Dosso passacavi
- Pali con gateway



In tale rappresentazione è possibile identificare i punti di confluenza del cablaggio per settore e il percorso previsto per il collegamento delle componenti di sistema al centro operativo SHM, tramite fibra ottica in dossi passacavi. Tale scala permette quindi di apprezzare le caratteristiche del sistema a partire dal perimetro dello stadio, per cui il *contenitore* stadio viene al momento “congelato” e analizzato nella scala di dettaglio maggiore.

A tale livello di analisi è possibile analizzare la disposizione dei sensori wireless, la quale verrà approfondita in ragione dell’analisi strutturale, al livello di analisi successivo per dettaglio. Si considerano inclinometri e celle di carico, poiché il loro layout è stato concepito regolare; per gli estensimetri, invece, il posizionamento deriva dalla modellazione, in modo puntuale.



Figura 6.70. Layout inclinometri e celle di carico

Per quanto riguarda le celle di carico, è stato previsto un sensore per ciascuno strallo. Grazie a tali celle estensimetriche sarà possibile evitare la verifica manuale della strallatura e si avrà una ottimizzazione generale legata alla ritesatura di tali elementi metallici.

LEGENDA



Figura 6.71. Layout celle di carico sugli stralli – base: planimetria generale

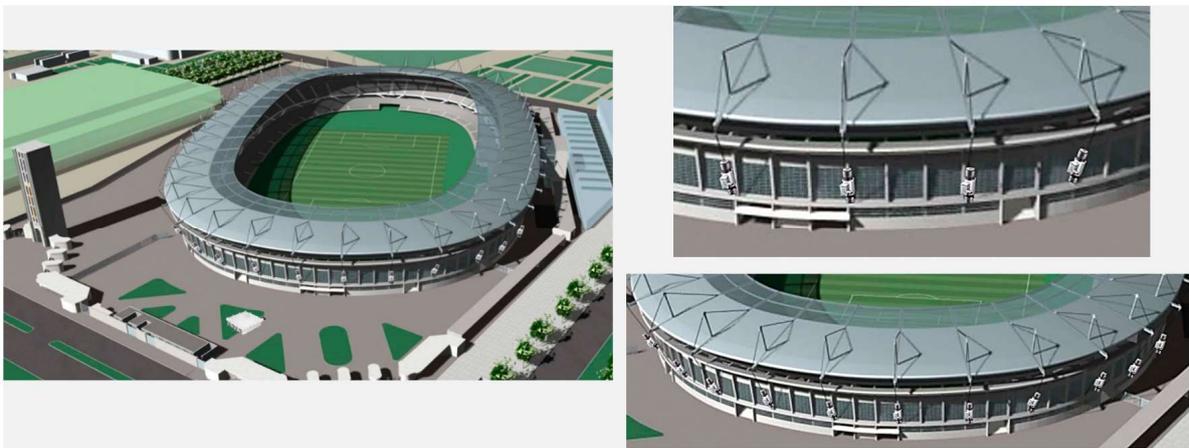


Figura 6.72. Layout celle di carico sugli stralli – base: simulazione digitale

In relazione all'applicazione dei sensori inclinometrici, si evidenzia che questi sono da collocarsi in corrispondenza della passerella della copertura: tale ubicazione è ottimale sia per ragioni legate al comportamento strutturale e, quindi, alla zona più critica da monitorare, sia in relazione all'accessibilità, potendo sfruttare tale opera metallica per l'installazione e l'eventuale manutenzione straordinaria in condizioni di sicurezza grazie agli associati sistemi anti-caduta. Il posizionamento è da effettuarsi sul parapetto della stessa, allo stesso modo dei faretti proiettori per l'illuminazione dell'impianto già presenti. I sensori sono disposti in modo regolare, per

garantire un monitoraggio complessivo, ottimizzando le risorse e tenuto conto della presenza dei sensori ottici distribuiti.

LEGENDA

-  Centro operativo SHM
-  Dosso passacavi
-  Pali con gateway
-  Inclinometro

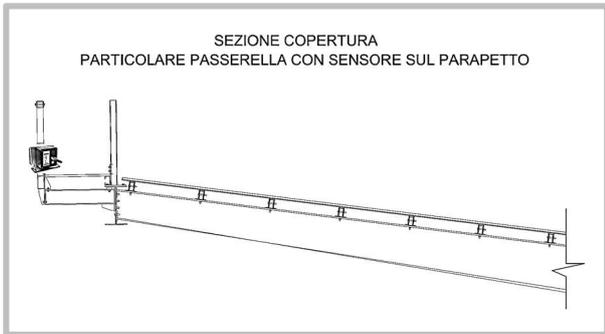
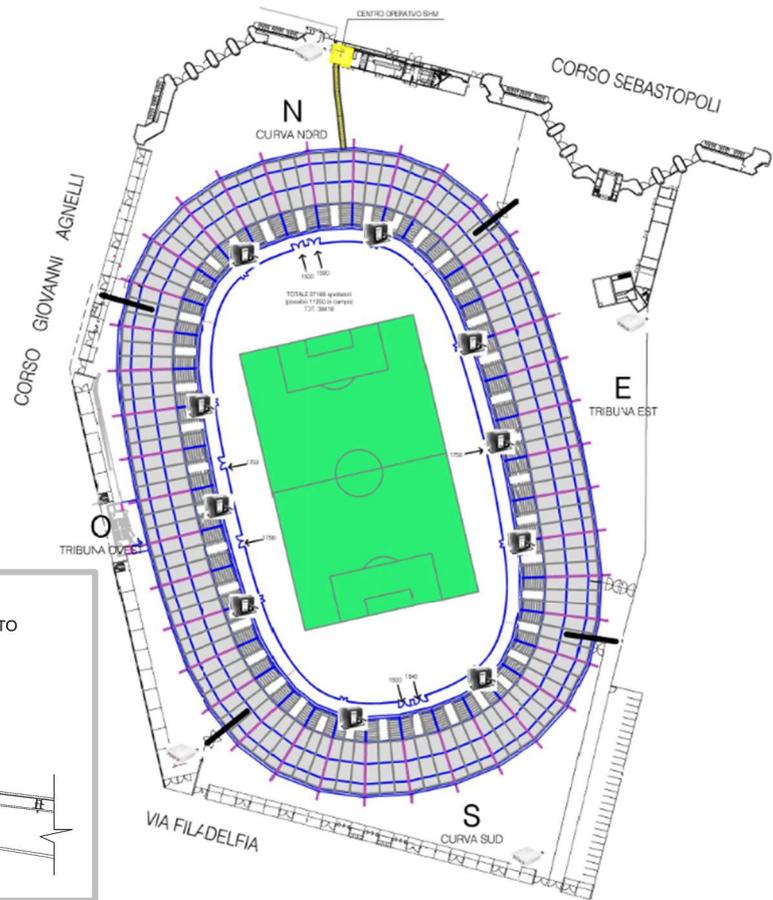


Figura 6.73. Layout inclinometri in copertura – base: planimetria generale

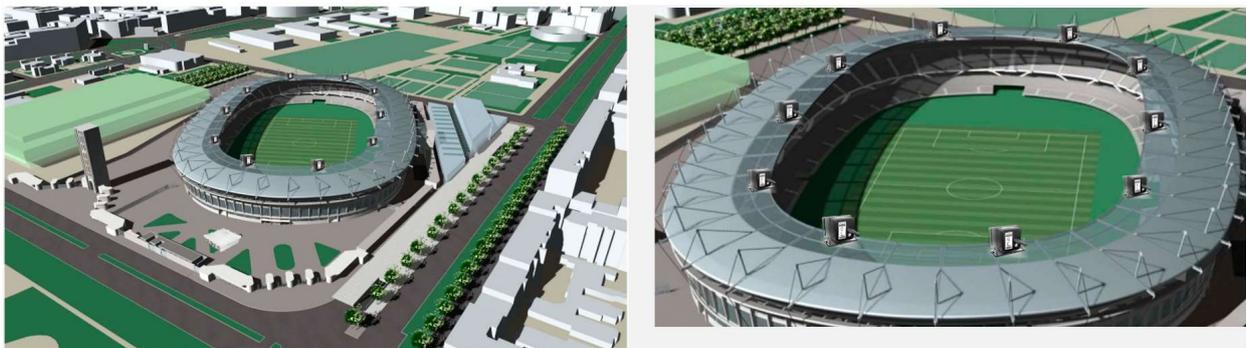


Figura 6.74. Layout inclinometri in copertura – base: simulazione digitale

Per quanto riguarda la tecnologia ottica, la soluzione che è stata definita prevede la seguente catena in fibra ottica:



Figura 6.75. La catena ottica di misura

Essa è costituita dall'accoppiamento delle 2 tipologie di fibra ottica sensing, la distribuita e la semi-distribuita. Nello specifico, la tecnologia semi-distribuita viene adoperata per assemblare una rete di misura di accelerazioni e spostamenti, mentre il ramo ottico distribuito consente la compensazione termica e si sfrutta al tempo stesso per misure deformative. I sensori sono disposti a passo variabile (mediamente di 2 m), al fine di poter apprezzare e cogliere il comportamento strutturale dello stadio: ciò implica una misurazione più fitta dell'accelerazione (circa ogni 2 o 4 m) e un controllo sugli spostamenti ogni 6 m, come ordine di grandezza. Questa regolarità può venir meno qualora si renda necessario cogliere puntualmente il comportamento strutturale dell'opera tramite posizionamento di un accelerometro e per relazionarsi con le caratteristiche geometriche intrinseche del manufatto. Inoltre, in alcune aree si è potuto ottimizzare il layout, adoperando la sola fibra distribuita, con conseguente risparmio economico, pur garantendo un elevato livello di sicurezza delle parti monitorate. Relativamente alla schematizzazione, il cavo ottico distribuito viene schematizzato con il colore blu, mentre il sensore ottico semi-distribuito è associato al colore rosso ed è ovviamente sempre accoppiato al primo per garantire la compensazione termica. La simbologia adoperata rispettivamente per viste in pianta e sezione viene riportata in seguito:

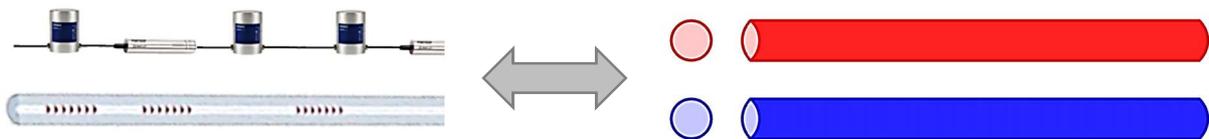


Figura 6.76. Simbologia di rappresentazione

Ulteriori semplificazioni di rappresentazione vengono indicate individualmente, tramite legenda.

Il principio di base nella definizione dei punti di misura è direttamente connesso al comportamento strutturale e, quindi, all'analisi strutturale svolta, riferimento rigoroso per l'installazione dei sensori all'interno della fibra ottica con tecnologia semi-distribuita. Infatti, l'installazione dei sensori non può prescindere dalla conoscenza del comportamento dinamico dell'edificio da monitorare, dipendente dalla sua tipologia strutturale e architettonica. Occorre quindi avere a priori tale conoscenza di base sui modi principali che dovranno essere identificati. In teoria la struttura può essere strumentata in tutti quei punti in cui si ritiene interessante valutarne il comportamento; in pratica, considerate le risorse finanziarie e di misura, la scelta dei punti di misura deve mirare ad ottenere tutte le informazioni necessarie. A tal fine, gli accelerometri non vanno posti in prossimità dei nodi modali, ossia punti in cui le deformate modali assumono valori nulli e dunque senza alcuna osservabilità dei modi. Ciò fa sì che alcune posizioni siano ottimali per alcuni modi ma non per altri. Il posizionamento ottimale dei punti di misura si verifica fissando il numero di modi che risulta significativo e scegliendo, quindi, tali punti in modo tale da poter prendere tutti i contributi.

In relazione allo stadio, tale procedura è da svolgersi per ciascun blocco della sua struttura: dapprima è necessario svolgere l'analisi modale per ogni blocco (3 tipi) e successivamente, dall'analisi della risposta modale, si devono definire le posizioni ottimali dei punti di misura, capaci di identificare i modi di vibrazione principali del blocco. Da qui è possibile procedere con la generalizzazione all'intero complesso dello stadio.

Nel caso in esame, l'analisi è limitata al blocco tipo 1 (120-01-02-03), archetipo della trattazione, per il quale ci si attiene alla definizione dell'andamento della dorsale.

I due seguenti schemi riguardano i modi principali rispettivamente in direzione Y (sisma a 90°) e in direzione X (sisma a 0°) e riportano le posizioni ottimali dei sensori per i modi principali (Massa modale > 5%) Y e X:

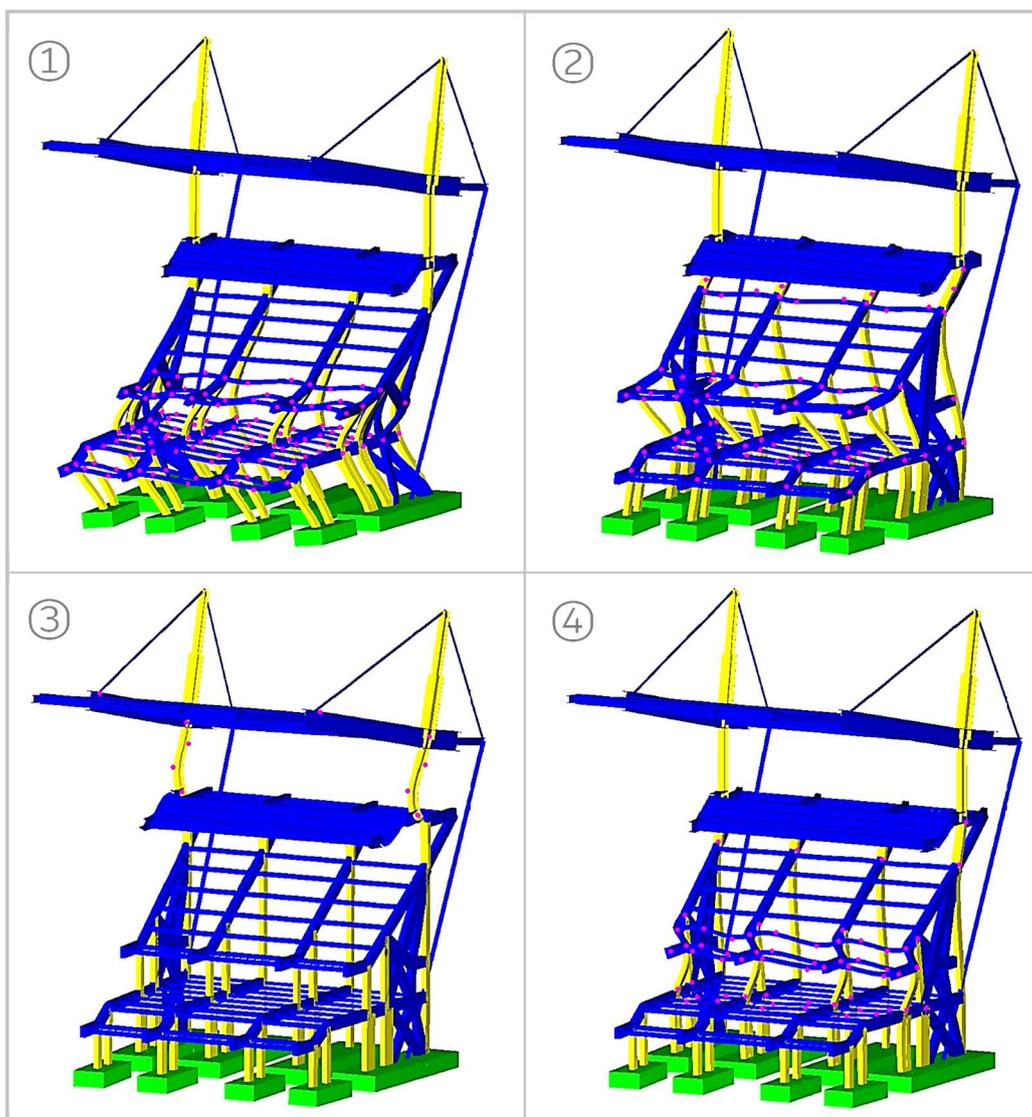


Figura 6.77. Posizioni ottimali dei sensori per i modi principali Y

Le posizioni ottimali sono quelle in cui l'accelerazione data dal corrispettivo modo è ben evidente, mentre il nodo modale per un dato modo di vibrare si trova proprio nel punto di flesso della deformata del modo stesso, per cui non conferisce alcun contributo in termini di risposta dinamica.

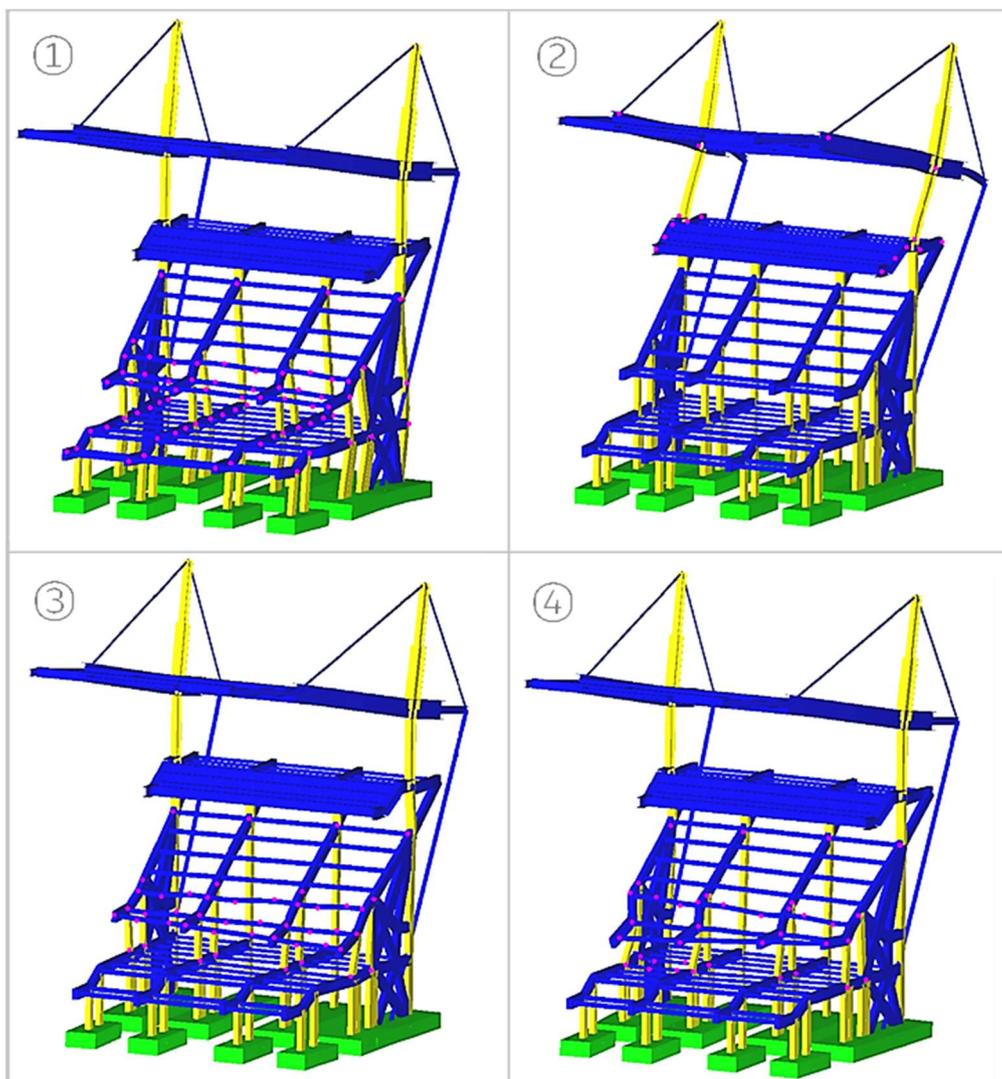


Figura 6.78. Posizioni ottimali dei sensori per i modi principali X

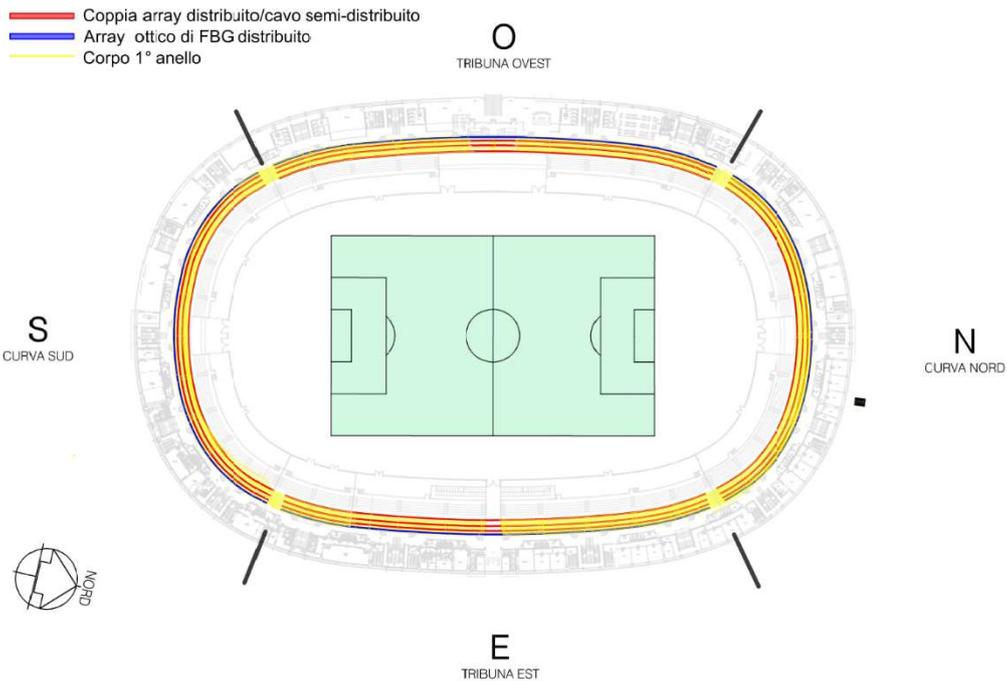
In aggiunta, si è resa necessaria la predisposizione di cavi ottici di FBG distribuiti (colore blu) al fine di monitorare i livelli di vibrazione e deformazione in componenti individuali, come ad esempio le gradinate del 3° anello caratterizzate da una significativa risposta deformativa a causa del materiale costitutivo e della loro geometria.

In ultimo, questa operazione di messa a punto della configurazione di misura, al tempo stesso, è stata svolta ricercando entro i limiti un'ottimizzazione pratica, tramite la tendenza alla regolarità di dorsali e punti di misura.

Le suddette considerazioni e le relative analisi critiche sono scaturite nella seguente configurazione generale del sistema di monitoraggio ottico, sintetizzata nei successivi disegni; complessivamente, all'interno di ognuno dei 4 settori previsti secondo l'organizzazione fondamentale del sistema i sensori vengono classificati sulla base del blocco di appartenenza, in modo funzionale alla comprensione del comportamento strutturale ricercato.

Per prima cosa, al fine di rappresentare il layout dei cavi ottici sono state predisposte delle planimetrie, distinte per livelli, in modo da riuscire a cogliere tutti gli aspetti della composita articolazione del sistema. Queste rappresentazioni consentono la visualizzazione delle dorsali in fibra ottica, le quali tengono conto delle caratteristiche geometriche e dei vincoli fisici del manufatto. Una breve descrizione chiarisce e motiva le scelte assunte.

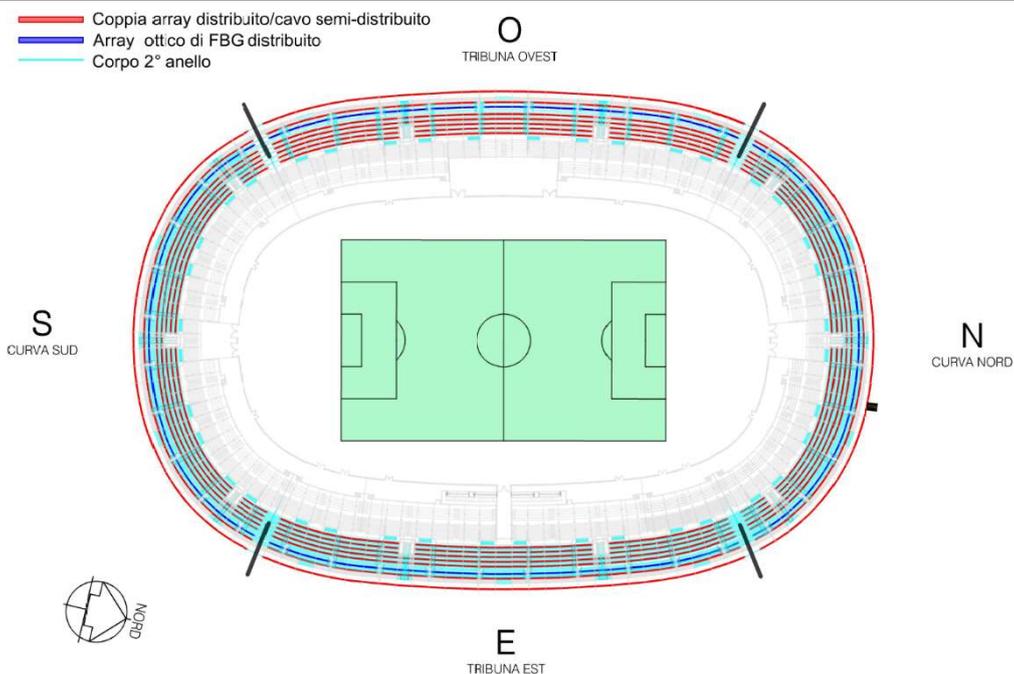
LAYOUT FIBRA OTTICA – LIVELLO: 1°



L'area di monitoraggio coincide con il sistema *gradinata* del 1° anello. La catena di misura in fibra ottica viene collocata in corrispondenza dello sbalzo (dorsale di 520 m circa), sulle 2 travi di sostegno delle gradinate (dorsali di 545 m circa), e a livello del solaio (dorsale di 565 m circa); in aggiunta, si predispone un array distribuito per controllo deformativo (dorsale di 555 m circa), su una trave dalla deformazione significativa.

Figura 6.79. Layout del sistema – 1° anello

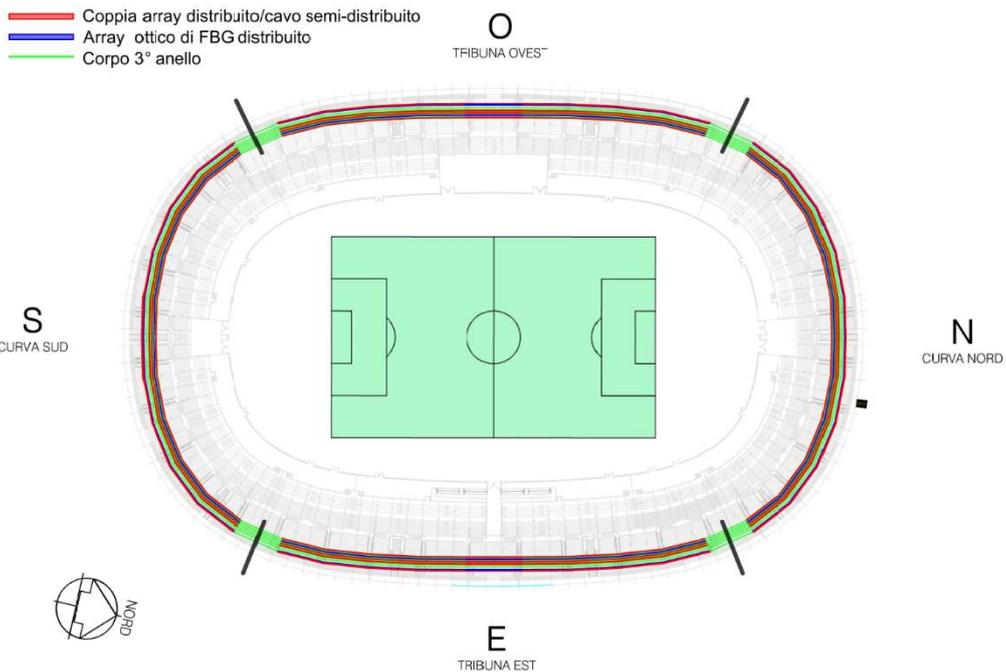
LAYOUT FIBRA OTTICA – LIVELLO: 2°



L'area di monitoraggio coincide con il sistema *gradinata* del 2° anello. La catena di misura in fibra ottica viene collocata in corrispondenza dello sbalzo (dorsale di 565 m circa), su n.5 travi di sostegno delle gradinate (dorsali da 575 m circa a 605 m circa); in aggiunta, si predispone un array distribuito per controllo deformativo (dorsale di 615 m circa), su una trave intermedia tra le monitorate precedenti dalla deformazione significativa.

Figura 6.80. Layout del sistema – 2° anello

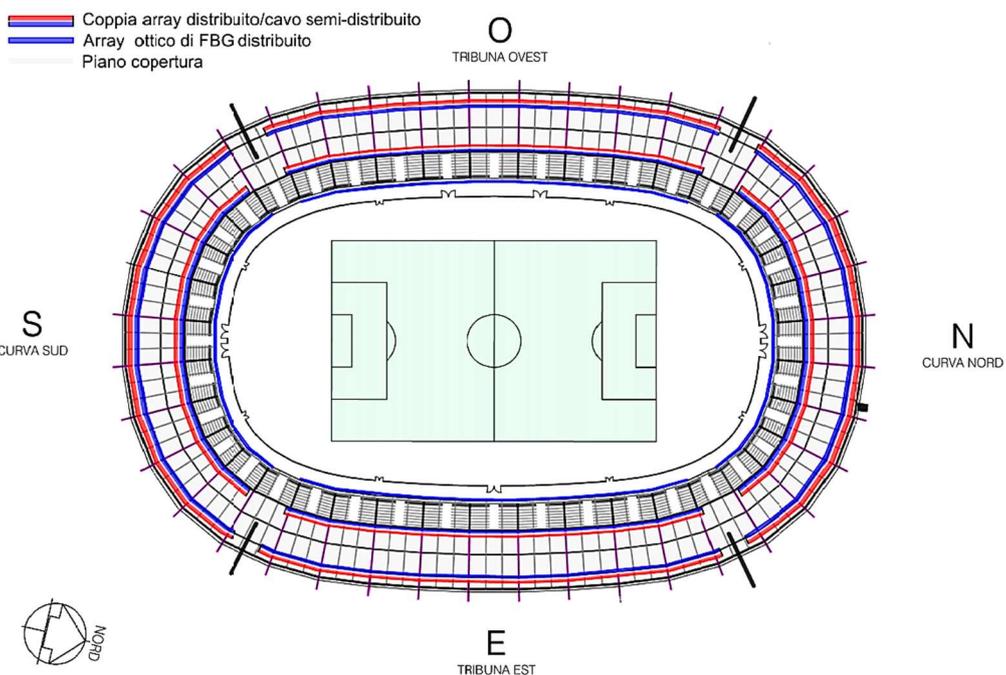
LAYOUT FIBRA OTTICA – LIVELLO: 3°



L'area di monitoraggio coincide con il sistema *gradinata* del 3° anello. La catena di misura in fibra ottica viene collocata in corrispondenza dell'estremità dello sbalzo (dorsale di 550 m circa), su una trave di sostegno delle gradinate (dorsali di 570 m circa) e all'incastro del corpo 3° anello (dorsale di 590 m circa). La rilevante risposta deformativa delle travi del 3° anello rende necessaria l'aggiunta di n.2 array ottici distribuiti.

Figura 6.81. Layout del sistema – 3° anello

LAYOUT FIBRA OTTICA – LIVELLO: COPERTURA



Le aree di monitoraggio predisposte sono n.3 e sono situate in corrispondenza della zona di ancoraggio al telaio esistente (dorsale di 600 m circa), ossia la zona di incastro, in prossimità della zona di ancoraggio dello strallo lato campo (dorsale di 500 m circa) e lungo la passerella (dorsale di 420 m circa). Quest'ultima dorsale è necessaria per il controllo delle deformazioni in tale punto estremo della copertura.

Figura 6.82. Layout del sistema – Copertura

Analisi a grande scala

Alla configurazione globale del sistema si contrappone la configurazione settoriale, alla scala più grande. A tal livello locale è possibile definire la disposizione generale dei cavi ottici, la quale presenta le seguenti caratteristiche:

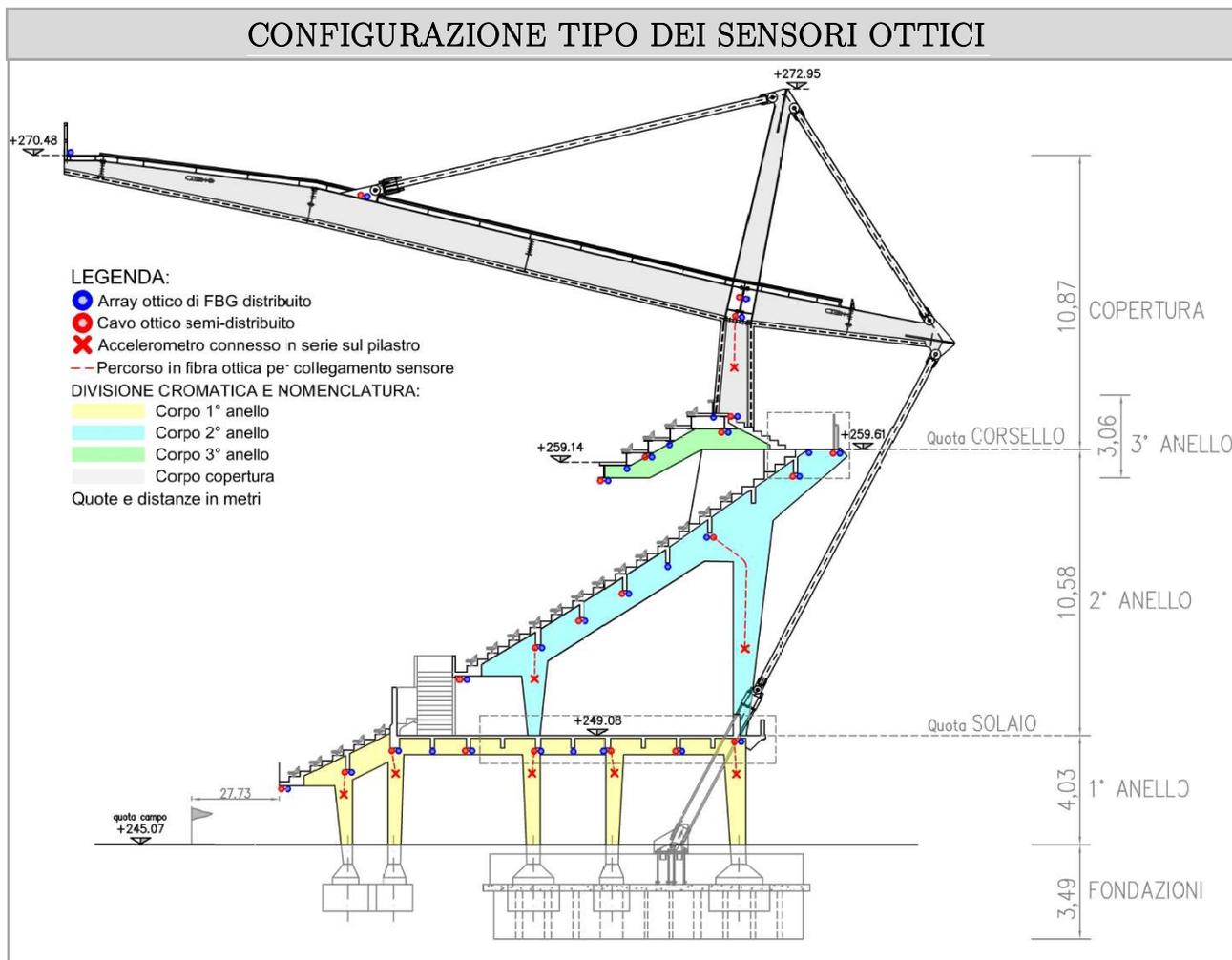


Figura 6.83. Posizionamento sensori

Si evidenzia che gli accelerometri connessi in serie sui pilastri indicati vengono collocati solo in corrispondenza dei telai e, in caso di elemento proprio solo del telaio rinforzato dalla copertura, soltanto su quest'ultima tipologia di telaio.

Le aree di monitoraggio predisposte vengono distinte in:

- corpo 1° anello;
- solaio;
- corpo 2° anello;
- corsello;
- corpo 3° anello;
- corpo copertura.

Dall'analisi a scala puntuale è possibile aggiungere a tale elenco:

- fondazioni;
- sperone tra 2° e 3° anello;
- ulteriori punti individuati in seguito come nodi critici (appartenenti al corpo 1° anello).

Analisi a scala puntuale

L'ultimo step dello studio del sistema di monitoraggio va ancora più nel dettaglio e mira ad attenzionare le peculiarità del calcolo strutturale che possono essere colte concettualmente solo *zoomando* al maggior livello di ingrandimento. Con analisi a scala puntuale si vuole intendere questa operazione di messa a fuoco dei particolari derivante da tale ricerca; concentrando l'analisi è possibile evidenziare gli elementi e le opere strutturali la cui risposta significativa o importanza nel complesso strutturale li rende idonei al monitoraggio. In questo modo la fase di pianificazione del sistema di monitoraggio e quindi della prova di monitoraggio strutturale può considerarsi a tutti gli effetti conclusa.

Per ciascuna tipologia di elemento idoneo al monitoraggio secondo tale analisi puntuale si predispone un'apposita soluzione o modalità di monitoraggio, la quale può essere rappresentata dall'estensione della dorsale ottica di misura con l'integrazione di sensori puntuali oppure dall'aggiunta in toto di cavi ottici, a seconda dello specifico motivo del monitoraggio, dell'area in cui si colloca l'elemento e della disponibilità di cavi ottici in zona limitrofa. Sostanzialmente, allo stesso modo di quanto previsto per i pilastri del 1° e 2° anello e per il pilastro di collegamento tra il 3° anello e la copertura, come rappresentato in Fig. 6.83, punti di misura singolari vengono introdotti apportando la medesima variazione al percorso di ambo i cavi ottici della catena. In altri termini, si procede all'aggiunta di sensori puntuali solo in corrispondenza dei telai di giunto, raggiungendo gli elementi di interesse per mezzo della sola fibra e collegando i dispositivi in serie, attuando un'estensione del cavo ottico.

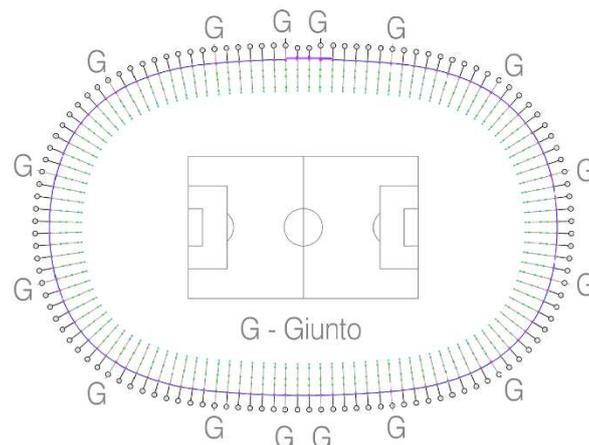


Figura 6.84. Posizionamento dei telai di giunto

L'analisi a scala puntuale è stata coadiuvata e supportata dalla conduzione di ulteriori considerazioni a livello di calcolo strutturale, in particolare derivanti dall'interpretazione delle verifiche globali riguardanti la stabilità. Il frutto di tali approfondimenti è rappresentato dalla

maggior comprensione delle specificità del sistema resistente, in primis l'individuazione dei *nodii critici* e delle *criticità* in termini di comportamento strutturale.

Tale analisi viene svolta considerando le forze scaricate in fondazione nel punto di applicazione del centro di pressione, una volta fissata una combinazione delle azioni della modellazione a telaio piano (n.6 nel caso in esame):

Risultante	Forza (kg)	Coordinate punto di applicazione (m)		Coppia (kgm)
Rx	133753.30	y = -28.91	z = -52.10	
Ry	147419.40	x = 26.23	z = 17.79	
Rz	357195.50	x = 19.51	y = -07.34	
Mx				-2622228.80
My				-6968457.50
Mz				3867230.30



$$Ps,x = -133.753,30 \text{ kg}$$

$$Ps,y = -147.419,40 \text{ kg}$$

$$Ps,z = -357.195,50 \text{ kg}$$

Figura 6.85. Risultante degli sforzi (Comb.04) e conseguenti forze in fondazione

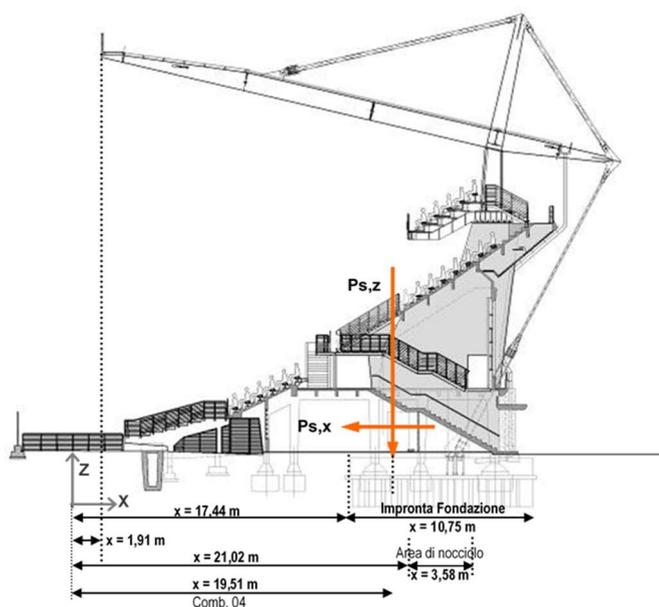


Figura 6.86. Forze scaricate in fondazione

I risultati della verifica di stabilità globale del telaio piano per forze agenti nel suo piano sono rappresentati da:

- Posizione del centro di pressione:
 interno all'impronta della sezione del plinto ma fuori dal nocciolo centrale di inerzia. La sezione non è interamente compressa e le zone in trazione (concentrate lato tirante) hanno una riduzione di sezione utile in quanto situate nella nicchia per l'alloggiamento dell'ancoraggio dello strallo posteriore;
- Informazioni sul sistema fondazionale e definizione della Zona I:
 in corrispondenza dei telai di giunto le fondazioni esistenti in corrispondenza del primo anello sono soggette ad interventi di rinforzo e consolidamento. Valutata la distribuzione dei diagrammi di pressione sul terreno, per i telai portanti la copertura sussiste il rischio, indotto da possibili cedimenti differenziali delle fondazioni, di dover trasferire sollecitazioni

eccessive attraverso elementi strutturali esistenti non oggetto di interventi di rinforzo (come rappresentato nello schema riportato a seguire – Zona “I”). Gli elementi strutturali di fondazione si presentano come adatti al monitoraggio, considerando anche gli effetti localizzati in corrispondenza dell’ancoraggio di base degli stralli posteriori e la capacità del sistema di ripresa e trasferimento degli sforzi indotti dalla copertura (come rappresentato nello schema riportato a seguire – Zona “II”);

- Definizione della Zona II:

la formazione di cerniere plastiche o il verificarsi di collassi in corrispondenza delle strutture esistenti non rinforzate del telaio di primo livello contribuirebbe al necessario trasferimento delle sollecitazioni al sistema fondazionale della Zona “II”, con conseguente aumento dello sbilanciamento delle pressioni sul terreno ed “eccitazione” del meccanismo di rottura per “pull-out” in corrispondenza del nodo di ancoraggio degli stralli posteriori;

- Individuazione dei Nodi critici I, II, III:

l’analisi approfondita ha condotto alla definizione di n.3 nodi critici collocati in corrispondenza degli elementi strutturali principali costituenti il telaio di primo livello; tali nodi coincidono con le zone di maggior criticità della struttura, per le quali si sono rese necessarie le attività manutentive a più elevata frequenza di ispezione, controllo ed intervento. In particolare, per i punti “A”, “B” e “C” collocati all’interno del nodo critico I nella parte esistente non soggetta ad interventi di rinforzo, identificabili dall’analisi come sotto-nodi critici, si rende necessario un monitoraggio puntuale dato che non risultano intercettati dai cavi ottici già pianificati nell’analisi precedente. Si evidenzia invece che il monitoraggio del nodo critico II risulta già contemplato considerando i cavi ottici concepiti nell’ambito dell’analisi a grande scala. Il controllo sul nodo III, infine, vista la sua posizione, avviene in coppia con il sistema di fondazioni;

- Identificazione delle criticità complessive della struttura:

la criticità principale è identificabile nel meccanismo di rotazione da instabilità globale causato dalla plasticizzazione delle Zone “Nodo I” e “Nodo III”. Al Nodo I è ipotizzabile l’associata rotazione da corpo rigido conseguente al collasso delle strutture esistenti non rinforzate; invece, al Nodo III si verifica il meccanismo di collasso locale per pull-out, come specificato al punto 2 di seguito. In secondo luogo, le altre “criticità” sono rappresentate dal comportamento della struttura soggetta ai carichi di esercizio più gravosi, per mezzo delle deformate in tali condizioni.

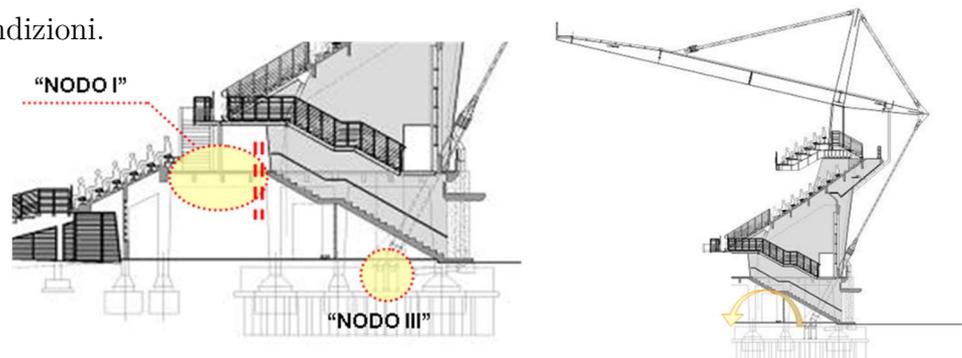


Figura 6.87. Criticità della struttura - meccanismo di rotazione da instabilità globale; focus sezione Nodo I

Le figure successive esemplificano i suddetti raggiungimenti realizzati tramite il calcolo strutturale e con effetti sull'analisi a scala puntuale.

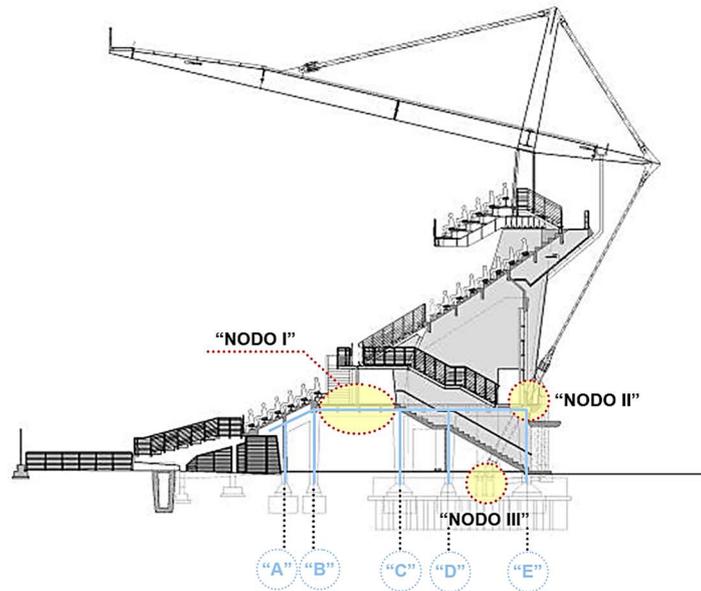


Figura 6.88. Schema grafico recante l'individuazione dei Nodi critici I, II, III

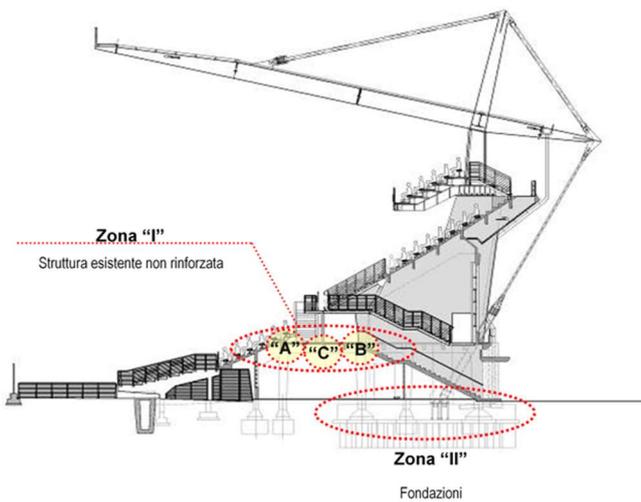


Figura 6.89. Distinzione Zone I e II e definizione dei punti "A", "B" e "C" nel nodo I

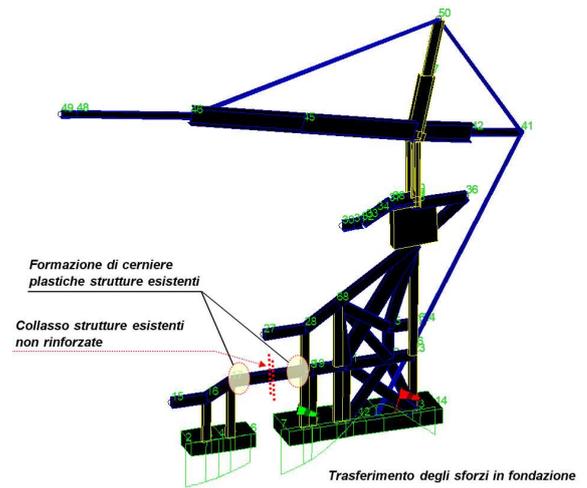


Figura 6.90. Eventuali cerniere plastiche inscritte nel nodo I e andamento degli sforzi in fondazione

Criticità della struttura – Deformata tipica nelle condizioni di carico di esercizio:

• Manifestazioni sportive – Massimo carico folla:

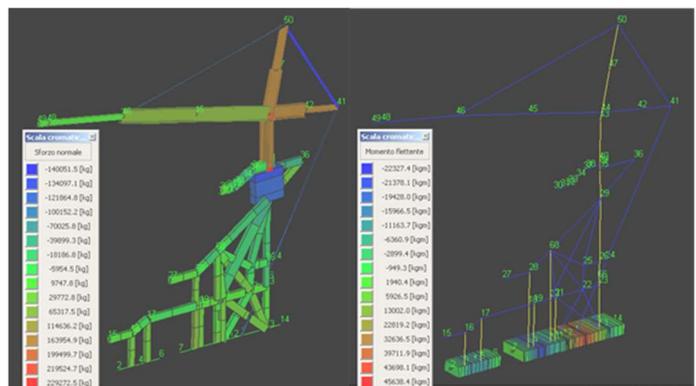
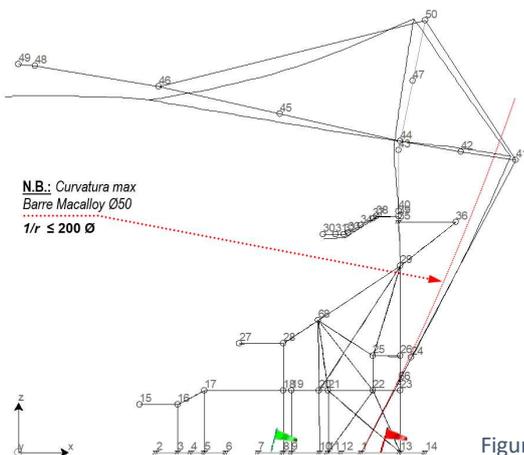


Figura 6.91. Criticità della struttura – massimo carico folla

b) Condizioni climatiche sfavorevoli – Massimo carico neve e azione ridotta del vento:

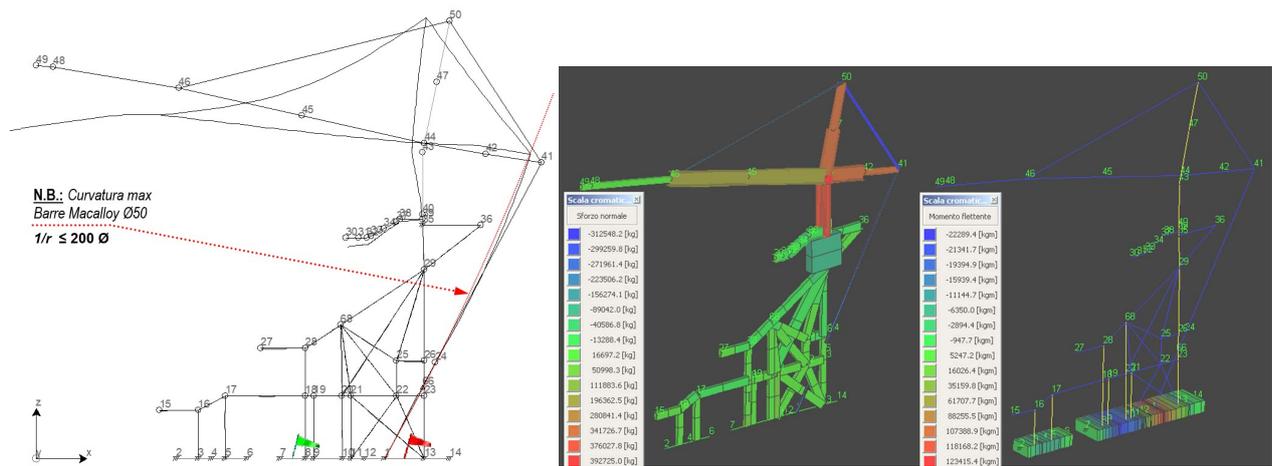


Figura 6.92. Criticità della struttura – massimo carico neve

Le seguenti rappresentazioni riportano le scelte prese come conseguenza di tali considerazioni di calcolo strutturale a livello puntuale: esse riguardano i nodi critici individuati, le fondazioni e lo sperone del telaio di giunto, tra telaio esistente e corpo copertura.

1. Punti A, B, C all'interno del nodo critico I:

LEGENDA:

- Array ottico di FBG distribuito
- Cavo ottico semi-distribuito
- ✗ Sensore connesso in serie
- Percorso in fibra ottica per collegamento sensore
- Corpo 1° anello
- Corpo 2° anello

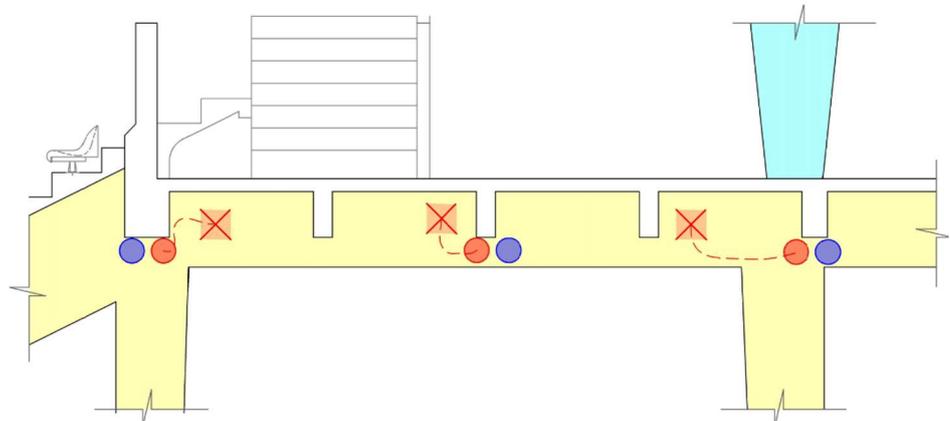


Figura 6.93. Posizionamento sensori ottici per i nodi critici

Il monitoraggio dei punti A, B e C viene attuato tramite l'introduzione di accelerometri in prossimità degli stessi, prevedendo l'estensione dei rami ottici esistenti, come da Figura 6.93, la quale mostra le catene ottiche interessate dalla variazione, il percorso della fibra di collegamento e i sensori connessi in serie (n.3 come i punti d'interesse).

2. Fondazioni e nodo critico III:

la criticità strutturale associata al sistema fondazionale è legata al nodo III e riguarda il meccanismo di collasso localizzato dovuto al ridotto margine di sicurezza (per riduzione di sezione utile) per la ripresa ed il trasferimento della trazione indotta dallo strallo posteriore. In altri termini, si tratta del meccanismo di collasso locale per pull-out.

Lo studio di tale meccanismo, avvenuto a partire dalla sezione di trasferimento dello sforzo considerando i potenziali spostamenti/rotazioni da corpo rigido indotti da perdita di stabilità globale, ha consentito una progettazione ragionata di tale componente del sistema.

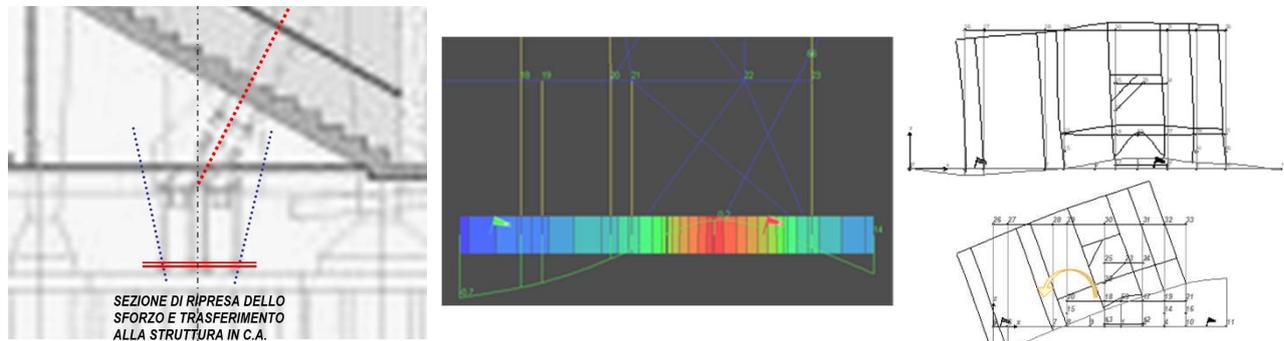


Figura 6.94. Sezione di ripresa dello sforzo dello strallo; sforzi in fondazione; deformata qualitativa; meccanismo di rotazione da corpo rigido per perdita di stabilità globale

Il piano prevede l'introduzione di un sensore ottico in corrispondenza del punto di ancoraggio dello strallo posteriore: da verifica degli sforzi localizzati, infatti, si evince come i valori della reazione vincolare generata da tale nodo siano molto elevati (-92653.8 kg per la componente Y nella combinazione 6, ad esempio).

LEGENDA:

- Array ottico di FBG distribuito
- Cavo ottico semi-distribuito
- × Sensore connesso in serie
- Percorso fibra ottica semi-distribuita
- Percorso fibra ottica distribuita
- Corpo 1° anello

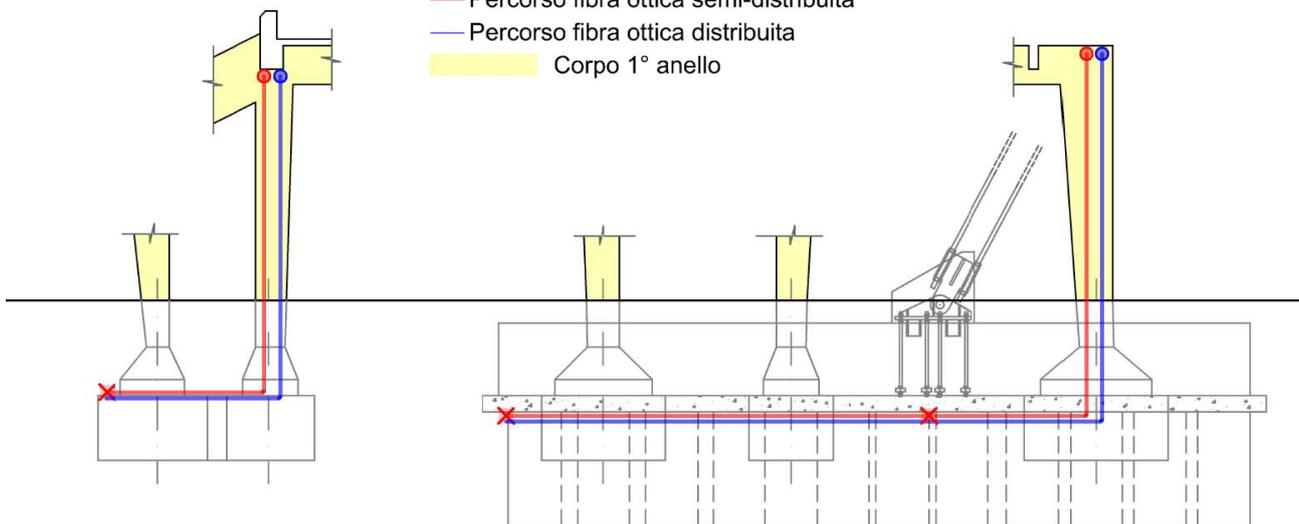


Figura 6.95. Posizionamento sensori ottici in fondazione

Inoltre, si prevede un sensore in corrispondenza dell'estremo sinistro di ciascuna trave di fondazione, secondo l'andamento degli sforzi trasferiti in fondazione. L'inserimento di tali sensori avviene grazie all'allungamento del percorso di 2 catene ottiche del corpo 1° anello; Fig. 6.95 riporta il tratto ulteriore di tali fibre in modo da consentire il monitoraggio delle travi di fondazione, parte del quale è aderente alle due travi stesse. Complessivamente, quindi, quando le due catene in esame raggiungono il telaio di giunto subiscono tale variazione di percorso, raggiungendo ciascuna trave di fondazione; l'array distribuito permette il monitoraggio delle deformazioni lungo la trave, mentre l'altro cavo ottico (colore rosso) si

impiega per il collegamento in serie dei sensori. Infine, le fibre ottiche ritornano nella posizione di ciascun pilastro del telaio, circoscrivendo la trave di fondazione, e continuano sino al successivo telaio di giunto.

3. Sperone tra 2° e 3° anello:

lo strumento analitico adoperato in quest'ultimo caso è rappresentato dalla verifica della struttura di elevazione, esplicitata nei nodi che vanno dallo sperone alla reticolare della copertura, in modo da cogliere il comportamento dello sperone stesso. Questo risulta caratterizzato da sollecitazioni notevoli che ne evidenziano il cimento statico; allo stesso tempo, i modi principali ne evidenziano il rilevante contributo dinamico.

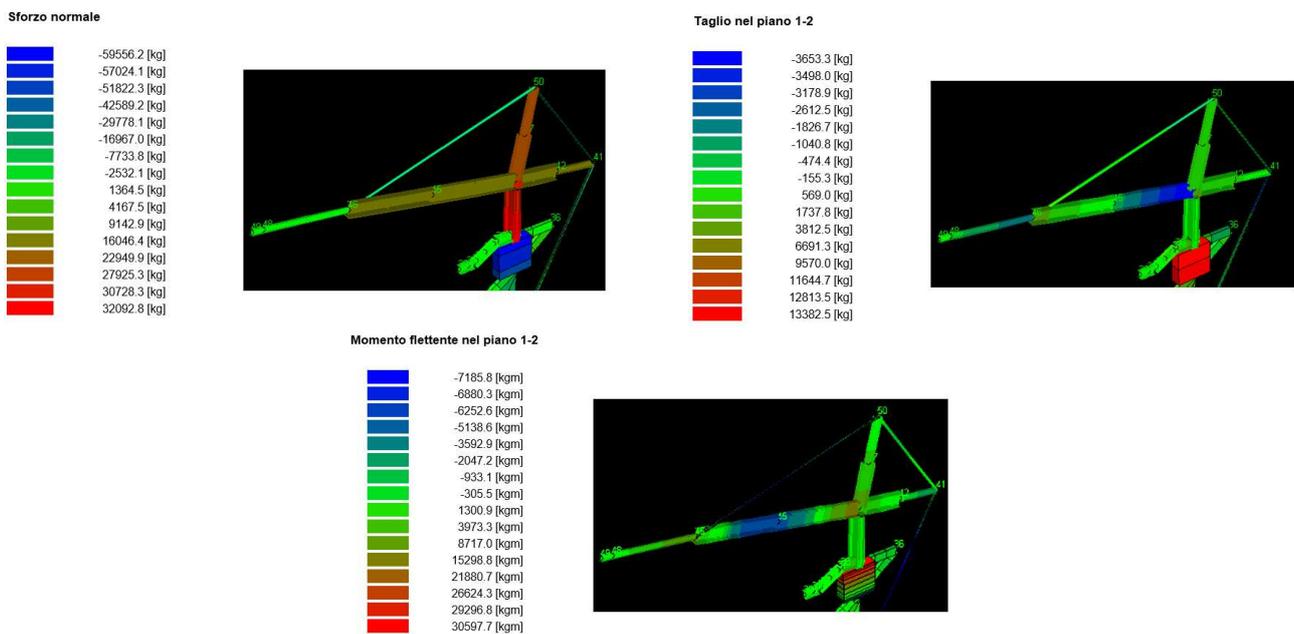


Figura 6.96. Sollecitazioni struttura di elevazione

Il monitoraggio viene attuato per mezzo di un accelerometro, connesso in serie con il cavo ottico già predisposto in precedenza sul terzo anello. Lo sperone è presente solo nei telai di giunto, per cui si predispose un sensore per ciascuno di essi.

LEGENDA:

- Array ottico di FBG distribuito
- Cavo ottico semi-distribuito
- ✗ Sensore connesso in serie
- Percorso in fibra ottica per collegamento sensore
- Corpo 2° anello
- Corpo 3° anello
- Corpo copertura

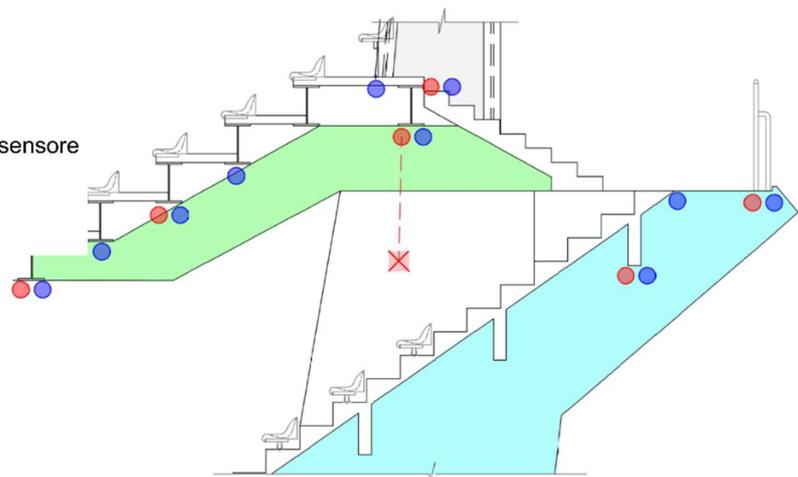


Figura 6.97. Posizionamento sensore sullo sperone

Conclusioni

La presente Tesi tratta la tematica del monitoraggio strutturale a partire dalla sua contestualizzazione nell'ambito della diagnostica strutturale e dalla relazione con le tradizionali tecniche di controllo dell'opera. Alle basi teoriche delle tecniche distruttive e non e del monitoraggio strutturale, inquadrato nel quadro dello *stato dell'arte*, si contrappongono gli studi di ricerca sulle tecnologie emergenti nel settore, in grado di avvalorare la tesi sull'applicabilità dello SHM. Questi culminano nell'analisi delle fibre ottiche e delle loro sorprendenti potenzialità, per quanto riguarda l'implementazione fisica di un sistema di monitoraggio, e nell'esame di un approccio BIM-based, per ciò che concerne gli aspetti gestionali del sistema.

Lo studio si dirama, quindi, su aspetti più pratici, rappresentati dal caso studio dello stadio Olimpico di Torino. Viene dedicato un opportuno spazio alla tipologia costruttiva chiamata in causa, per le sue particolari caratteristiche, e si approfondisce il quadro storico in cui l'impianto si inserisce, facilmente estendibile a svariate opere dello stesso tipo. Con queste ultime parti si vuole evidenziare la necessità di una manutenzione attenta e tempestiva; il monitoraggio dinamico è la soluzione, che trova forma nella definizione di una strategia di monitoraggio dello stadio.

Si procede a definire tale soluzione di sistema per il monitoraggio, partendo dalla constatazione delle pratiche attualmente in vigore in ambito di conservazione del manufatto e concependo le caratteristiche generali in termini di catena di misura. La progettazione del sistema è dunque la parte rigorosa, di calcolo: viene eseguita la modellazione strutturale del telaio piano tipo e di un blocco della struttura e si svolge l'analisi sismica per eccellenza, l'analisi dinamica modale, tramite il software *WinStrand* della *EnExSys*. Il calcolo strutturale consente di conoscere il comportamento delle opere da monitorare e consente di giustificare le scelte intraprese. Si procede al posizionamento dei sensori, in punti di misura in grado di cogliere i modi principali, ossia in punti di accelerazione ben evidente. Si pensa più in ampio, alle caratteristiche generali del sistema, concependo un'organizzazione settoriale e un centro operativo SHM.

Complessivamente è possibile affermare che l'obiettivo viene raggiunto mediante l'attuazione di un controllo permanente, automatico ed efficientemente gestito. Gli sviluppi futuri riguardano per l'appunto, in primis, la pianificazione di un Digital Twin del manufatto, di cui nel presente si gettano le basi: l'idea dovrebbe essere quella di attivare un gemello digitale dell'impianto, in cui vengono contenute e integrate tutte le informazioni provenienti dai vari ambiti e servizi connessi allo stadio (strutture, illuminazione, impianto di ventilazione, impianto termico, ecc.), concependo un sistema unico per il monitoraggio in senso lato in grado di garantire la gestione efficace dei dati associati al bene grazie all'ottimizzazione. Si tratta concettualmente di estendere il modello una realtà oltre, rendendolo un modello dinamico, in grado di mutare sulla base dei dati provenienti dai sensori riguardanti i diversi ambiti.

Le altre applicazioni future non possono che riguardare l'esecuzione di tutte le altre fasi del processo di monitoraggio e il model updating. Quest'ultimo riguarda la possibilità di aggiornare il modello strutturale costruito sulla base dei risultati del monitoraggio, in modo da tararlo sulla risposta dinamica, ottenendo una risposta più affidabile in relazione al comportamento reale.

In breve, si vuole fornire un quadro armonizzato e unitario in cui ciascuna parte risulti funzionale all'altra, con la teoria funzionale alla pratica applicativa e viceversa. Delle svariate chiavi di lettura citate si conviene di concludere enfatizzandone una su tutte, legata all'analogia di fondo con la medicina e l'uomo: un ottimo stato manutentivo e una condizione di conservazione accurata sono indice di un patrimonio sano, che non si trascura, e logicamente in accordo con l'intelligente affermazione espressa da Benjamin Franklin nel 1736 in ambito di prevenzione degli incendi, particolarmente dannosi nel periodo, secondo cui "un grammo di prevenzione vale più di un chilo di cura".

Bibliografia e Sitografia

- [1] R. Pucinotti: “Patologia, Diagnostica, Indagini strutturali” – Prefazione di Enzo Siviero
- [2] Enciclopedia online Treccani <https://www.treccani.it/vocabolario/diagnostica/>
- [3] Wikipedia <https://it.wikipedia.org/wiki/Diagnosi>
- [4] Enciclopedia online Treccani <https://www.treccani.it/vocabolario/diagnosi/>
- [5] Enciclopedia online Treccani https://www.treccani.it/vocabolario/diagnosi_tecnica/
- [6] Enciclopedia online Treccani
- [7] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 3: Termini, definizioni e abbreviazioni
- [8] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016
- [9] Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18) – d.m. 17 gennaio 2018 cfr. §2.4.1: Vita nominale di progetto
- [10] Rotta A., La durabilità e il degrado delle strutture in cemento armato, digilander.libero.it/FlyingDutch/articoli/cls.htm
- [11] Maiellaro N., Prove non distruttive in edilizia: Prove sclerometriche ed ultrasoniche sui calcestruzzi, CNR-IRIS, Vol. I, Quaderno n.12, 1995
- [12] Pedefferri P., Bertolini L., La curabilità del calcestruzzo armato, McGraw-Hill, 2000
- [13] Augenti N., Il crollo dell’edificio in Napoli al rione Arenella. Crolli ed affidabilità delle strutture, Structural Diseases and reliability – Atti del II Convegno Internazionale su Crolli e Affidabilità delle strutture, Napoli, CUEN, pagg. 21-28, 2003.
Capuozzo S., Due casi emblematici di collassi spontanei a Napoli, Crolli ed affidabilità delle strutture – Structural Diseases and reliability – Atti del II Convegno Internazionale su Crolli e Affidabilità delle strutture, Napoli, CUEN, pagg. 41-48, 2003.
- [14] Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici, Prof. Manzone - Introduzione
- [15] Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici, Prof. Manzone - Introduzione
- [16] Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici, Prof. Manzone - Introduzione
- [17] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 11: Utilizzo delle tecniche di monitoraggio strutturale nella gestione del costruito
- [18] Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici, Prof. Manzone - Introduzione
- [19] Legge Merloni (1994), “Legge quadro in materia di lavoro pubblici”, Gazzetta Ufficiale della

- Repubblica Italiana, 11 febbraio 1994, n.109
- [20] Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18) – d.m. 17 gennaio 2018 cfr. §10.1: Caratteristiche generali
- [21] “Controllo delle condizioni di stabilità delle opere stradali” Circolare Ministeriale 6736/61 A1
- [22] ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile, Metodologie e tecniche di monitoraggio e di caratterizzazione strutturale di ponti, Prof. Ing. Claudio Modena
- [23] A. Pierdicca, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” - Introduzione
- [24] “Decreto Genova in Gazzetta Ufficiale: riepilogo di tutte le misure d’interesse” 20/11/2018, InGenio
- [25] ANSFISA <https://www.ansfisa.gov.it/>
- [26] AINOP <https://ainop.mit.gov.it/portale#/>
- [27] Dossier 5 Novembre 2018 “Disposizioni urgenti per la città di Genova, la sicurezza della rete nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, gli eventi sismici del 2016 e 2017, il lavoro e le altre emergenze” (testo approvato dalla Camera dei deputati)
- [28] §7.2.2: “Documentazione del sistema”, Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti, 2020
- [29] D.l. n.34/2020 convertito in legge n.77/2020: Testo coordinato con le modifiche della legge agosto (legge 126/2020) e della legge di Bilancio 2021 (legge 178/2020), DL 59/2021 e DL 77/2021 (decreto Semplificazioni 2021 e legge di conversione)
- [30] <https://www.ediltecnico.it/79681/monitoraggio-strutturale-in-continuo-decreto-rilancio/>
- [31] https://www.casaclima.com/ar_42282__decreto-rilancio-sismabonus-centodieci-esteso-anche-sistemi-monitoraggio-strutturale-continuo.html
- [32] Cangialosi, Francesco, et al. (2010) La manutenzione edile e degli impianti tecnologici, FrancoAngeli, Milano.
- [33] Yang, Y.; Zhang, Y.; Tan, X. Review on Vibration-Based Structural Health Monitoring Techniques and Technical Codes. *Symmetry* 2021, 13, 1998. <https://doi.org/10.3390/sym13111998>
- [34] Moreu F, Li X, Li S and Zhang D (2018) Technical Specifications of Structural Health Monitoring for Highway Bridges: New Chinese Structural Health Monitoring Code. *Front. Built Environ.* 4:10. doi: 10.3389/fbuil.2018.00010
- [35] Aktan, AE, Catbas, FN. Development of a model health monitoring guide for major bridges. Federal Highway Administration Research and Development (CONTRACT/ORDER NO.DTFH61-01-P-00347), 2002,
- [36] Bergmeister, K . Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures: state-of-the-art report (Fib Task Group 5.1), the International Federation for Structural Concrete, 2002.
- [37] Mufti, AA. Guidelines for structural health monitoring. Winnipeg, MB, Canada: ISIS Canada, 2001
- [38] SAMCO Final Report 2006 F08b Guideline for Structural Health Monitoring.
- [39] “Gestione dei ponti esistenti: il quadro normativo italiano e il confronto con alcune

- normative internazionali.”, INGENIO, 2020
- [40] Wenzel, H. Health monitoring of bridges. Chichester: John Wiley & Sons, 2009
- [41] Yang, Y, Li, QS, Liu, G. Application and analysis of Technical code for monitoring of building and bridge structures GB50982–2014. Beijing, China: China Building Industry Press, 2016 (in Chinese).
- [42] GB 50982-2014 . Technical code for monitoring of building and bridge structures (in Chinese).
- [43] F. Manzone, “Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici” – §5: Monitoraggio delle strutture
- [44] Pucinotti R., Criteri per la progettazione di operazioni di diagnosi strutturale, Atti conferenza nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio e Diagnostica, Ravenna, 10° Congresso Nazionale dell’AIPnD, pagg. 253-261, 2003
- [45] Norme Tecniche per le Costruzioni, §8: Costruzioni esistenti; §8.5: Definizione del modello di riferimento per le analisi
- [46] Manzone F., “Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici” - §4: Metodi di indagine strutturale
- [47] Non-Structural Cracks in Concrete – Concrete Society Technical Report No.22 – 3rd edition, 1992
- [48] Foto derivate dal libro “Testing of Concrete in Structures”, John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione.
- [49] Foto derivate dal libro “Testing of Concrete in Structures”, John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione.
- [50] Foto derivate dal libro “Testing of Concrete in Structures”, John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione.
- [51] Foto derivate dal libro “Testing of Concrete in Structures”, John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, 4th edition. Le immagini sono sottoposte a rielaborazione
- [52] Manzone F., “Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici” - §4.4: Indagini sulle strutture in muratura
- [53] Norma UNI EN 12504: Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione
- [54] E.P. Carvalho et al. / Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars, 2017
- [55] d.P.R. 207/2010 – Regolamento di attuazione del codice dei contratti pubblici; art. 38: “Piano di manutenzione dell’opera e delle sue parti”
- [56] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 3: Termini, definizioni e abbreviazioni; §3.1.1: monitoraggio strutturale
- [57] A. Pierdicca, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” - §1.2: Il monitoraggio strutturale: classificazioni
- [58] A. Pierdicca, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” - §1.3: Structural Health Monitoring (SHM)
- [59] Articolo di Ingenio: “Il monitoraggio strutturale e la definizione del piano di monitoraggio”, Ing. Vincenzo Giannetto, Ing. Marika Volpe – Indagini strutturali srl (<https://www.ingenio-web.it/26655-il-monitoraggio-strutturale-e-la-definizione-del-piano-di-monitoraggio>)

- [60] Manzone F., “Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici” - §7: Esempi applicativi; §7.4: Stadio Olimpico Grande Torino
- [61] A. Pierdicca, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” - §3: La catena di misura
- [62] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016
- [63] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 5: Progettazione di massima del sistema di monitoraggio; Punto 5.1: Generalità
- [64] A. Pierdicca, F. Mattiauda, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” 2021 – Capitolo 2: Cenni alla teoria dei segnali; §2.8.1: Il teorema di Nyquist-Shannon
- [65] A. Pierdicca, F. Mattiauda, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” 2021 – Capitolo 2: Cenni alla teoria dei segnali; §2.8.2: Il fenomeno dell’aliasing
- [66] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 5: Progettazione di massima del sistema di monitoraggio; Punto 5.9.1: Espressione dell’accuratezza richiesta
- [67] Norma UNI/TR 11634 “Linee Guida per il monitoraggio strutturale” 2016 – Capitolo 6: Progetto esecutivo del sistema di monitoraggio
- [68] A. Pierdicca, F. Mattiauda, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” 2021 – §3.3: Sensoristica: gli accelerometri
- [69] A. Pierdicca, F. Mattiauda, “Il monitoraggio dinamico delle strutture” 2021 – §3.3.1: Accelerometri: caratteristiche principali
- [70] Ljung L., System Identification – Theory for the user, 1987
- [71] P. Van Overschee and B. De Moor, Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Application, Kluwer Academic Press Dordrecht (The Netherlands), 1996
- [72] T. Kailath: Linear Systems. Prentice Hall Inc., 1980
- [73] Brincker, R., & Andersen, P. (2006). Understanding Stochastic Subspace Identification. In Conference Proceedings: IMAC-XXIV : A Conference & Exposition on Structural Dynamics Society for Experimental Mechanics.
- [74] Ewins D.J., Modal Testing: Theory and Practice. Letchworth, England, 1984
- [75] Allemang R.J., A correlation coefficient for modal vector analysis. BDL., Orlando, FL, USA: Proc. 1st SEM Int. Modal Anal. Conf., 1982
- [76] Manzone F., “Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici” - §5: Il monitoraggio delle strutture; §5.6: Nuove tecnologie emergenti: la fibra ottica
- [77] <https://www.studiotarantelli.it/articoli/fibra-ottica-e-smart-city.htm>
Studio Tarantelli, “La fibra ottica e la connessione <veloce> per una città moderna”
- [78] Ansari F., State-of-the-art in the Applications of Fiber Optic Sensors to Cementitious Composites, Cement & Concrete Composites, 19 (1), 3-19, 1997
- [79] Wikipedia, Legge di Snell
- [80] Pinet, E., Hamela, C., Glišić, B., Inaudib, D. and Mironc, N. Health monitoring with optical fiber sensors: from human body to civil structures. SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring 14th International Symposium. San Diego, California USA: 2, 2007
- [81] Enckell M., Structural health monitoring using modern sensor technology: long-term

- monitoring of the New Årsta Railway Bridge, 2006
- [82] Yoany Rodríguez García, Jesús M. Corres, Javier Goicoechea, "Vibration Detection Using Optical Fiber Sensors", *Journal of Sensors*, vol. 2010, Article ID 936487, 12 pages, 2010. <https://doi.org/2010/936487>
- [83] <http://www.opticalsensing.it/tecnologie-ottiche/sensori-in-fibra-ottica/>
Optical sensing technologies, Tecnologie ottiche: sensori in fibra ottica
- [84] Enckell M., Structural health monitoring using modern sensor technology: long-term monitoring of the New Årsta Railway Bridge, 2006
- [85] Mojtaba Valinejadshoubi, Ashutosh Bagchi, and Osama Moselhi, Managing Structural Health Monitoring Data Using Building Information Modelling Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Montreal, Canada
- [86] <https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-dati-creme-architetti-progettazione-bandi-gara/>
- [87] Becerik-Gerber B., F. Jazizadeh, N. Li, and Calis G., 2012, Application areas and data requirements for BIM-Enabled facilities management, *J. Constr. Eng. Manage.*,138(3): 431-442.
- [88] Del Grosso, Andrea & Basso, Paolo & Ruffini, Lorenzo & Figini, Fabio & Cademartori, Marcello. (2017). Infrastructure management integrating SHM and BIM procedures.
- [89] Sternal M., and Dragos M., 2016, BIM-Based modeling of structural health monitoring systems using the IFC standard, *Proceedings of the 28th Forum Bauinformatik*, Hanover, Germany.
- [90] Andrea Nardinocchi, Direttore Tecnico Italferr S.p.A. (Gruppo FS Italiane) – Francesco Folino, BIM Coordinator: Il Gemello Digitale a supporto del monitoraggio delle infrastrutture attraverso l'uso del BIM e dei sensori IOT – articolo pubblicato su InGenio Web