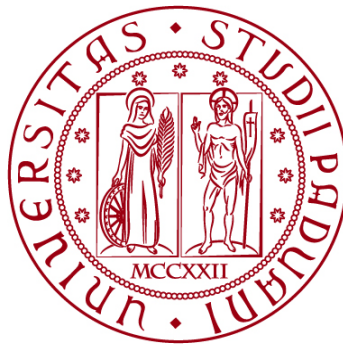


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**Studio di soluzioni interoperabili per lo Structural Health Monitoring (SHM) e i Bridge Management System (BMS) BIM based.**

Relatore:  
Chiar.mo PROF. ING. ROBERTO SCOTTA  
Correlatori:  
PROF. CARLO ZANCHETTA

Laureando: RODRIGO BORTOLINI  
Matricola: 1190635

**ANNO ACCADEMICO 2021-2022**

*Alla mia famiglia, a Laura e a tutte le  
persone che mi hanno sostenuto.*

*Un ringraziamento particolare al prof. Roberto Scotta,  
prof. Carlo Zanchetta, all'azienda CSPFea  
e a tutti i collaboratori.*

<b>Abstract (ita)</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract (engl)</b> .....	<b>3</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>5</b>
1. Premessa .....	5
<b>Metodologia</b> .....	<b>7</b>
2. Lo stato dell'arte .....	8
3. Analisi in letteratura .....	10
4. Risultati, conclusioni e ulteriori sviluppi .....	11
<b>PRIMA PARTE</b> .....	<b>13</b>
<b>Procedure per la gestione della sicurezza dei ponti e viadotti esistenti</b> .....	<b>15</b>
1. Circolare Ministeriale LL PP 6736/61° .....	15
2. Circolare Ministeriale LL PP 220977 02/08/1980 .....	16
3. Circolare Ministeriale LL PP 34233 25/02/1991 .....	16
4. Norma UNI 10985 "Vibrazioni su ponti e viadotti" 2002 .....	17
5. Norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" 2016 .....	17
6. Decreto Genova 19/11/2018 .....	19
7. Linea Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti, 17/10/2020 .....	20
7.1. Livello 0 – Censimento delle opere .....	22
7.2. Livello 1 – Ispezioni visive e schede di difettosità.....	23
7.3. Livello 2 – Analisi dei rischi rilevanti e classificazione su scala territoriale.....	26
7.4. Livello 3 – Valutazione preliminare dell'opera.....	26
7.5. Livello 4 – Verifica accurata .....	27
7.6. Sistema di sorveglianza e monitoraggio.....	27
<b>Monitoraggio strutturale – Structural Healt Monitoring (SHM)</b> .....	<b>31</b>
1. Assiomi del monitoraggio strutturale .....	32
2. Conoscenza/cultura del monitoraggio strutturale.....	33
2.1. Strategia nel monitoraggio strutturale.....	33
2.2. Requisiti nel monitoraggio strutturale .....	34
2.3. Tipologie di monitoraggio strutturale .....	34
2.4. Architettura di un sistema di monitoraggio .....	36
<b>Sensori</b> .....	<b>39</b>
1. Sensori statici .....	39
1.1. Pendolo .....	40
1.2. Inclinometro .....	41
1.3. Estensimetro a Corda vibrante .....	43
1.4. Trasduttore di spostamento .....	45
1.5. Celle di carico.....	46
1.6. Galleggianti .....	47

1.7.	Collare scorrevole magnetico .....	48
1.8.	Sonar .....	49
1.9.	Asta mobile temporizzata .....	50
1.10.	Corrosione delle armature .....	51
1.11.	Sensore di temperatura .....	52
1.12.	Sensore di umidità .....	52
2.	Sensori dinamici .....	53
2.1.	strain gauge .....	53
2.2.	Accelerometri .....	54
3.	Nuove tecnologie .....	57
3.1.	Sensori a fibra ottica .....	58
3.2.	TInRAR .....	60
3.3.	A-DTInSAR .....	61
<b>SECONDA PARTE .....</b>		<b>63</b>
<b>Caso studio: Ponte sul Brenta .....</b>		<b>65</b>
1.	Descrizione dell'opera .....	65
<b>Modellazione informativa con software infrabim .....</b>		<b>67</b>
1.	Descrizione del software impiegato .....	67
2.	Fasi di modellazione .....	69
2.1.	Prima fase .....	70
2.2.	Seconda fase .....	87
2.3.	Terza fase .....	90
3.	Esportazione in formato aperto .ifc .....	92
<b>Bridge Management System - BMS .....</b>		<b>95</b>
1.	Dati di primo livello .....	98
2.	Dati di secondo livello .....	100
2.1.	Rischio frane .....	101
2.2.	Rischio idraulico .....	102
3.	Dati di terzo e quarto livello .....	103
3.1.	Elementi strutturali .....	104
3.2.	Elementi non strutturali .....	107
<b>Bibliografia .....</b>		<b>110</b>
<b>Indice immagini .....</b>		<b>113</b>

La sicurezza di ponti e viadotti è diventato un tema di estrema priorità dopo la tragedia del Ponte Morandi con la necessità di mettere in sicurezza le infrastrutture e poterle controllare. Grazie all'impiego di sistemi di gestione o *Bridge Management System* (BMS) è possibile costruire inventari e database di ispezione, prevedere futuri scenari di ammaloramento e conseguentemente pianificare interventi di manutenzione, riparazione e riabilitazione strutturale in maniera efficiente ed ottimale.

Per poter conoscere la struttura è possibile far affidamento ai sistemi di monitoraggio strutturale o *Structural Health Monitoring* (SHM). In questi anni questa tecnologia si è estremamente sviluppata ma è in continua fase di sviluppo data la carenza legata alla gestione dei dati; essi possono essere gestiti applicando delle tecniche innovative focalizzandoci sull'*intelligenza artificiale* (IA) con l'applicazione del *Machine Learning* per l'alto contenuto dei dati. I sistemi hardware sono in grado di captare milioni di dati gestendoli in piattaforme condivise cloud, dove avvengono dei processi di pulizia e rielaborazione dei dati in modo da poterli rendere leggibili dagli ispettori dando un contenuto chiaro ed immediato.

Oltre ad un'analisi strutturale *day-by-day* è possibile riutilizzare gli stessi dati per poter prevedere il comportamento dell'opera implementando degli algoritmi dedicati ai modelli di previsione e deterioramento. Essi sono necessari per poter pianificare le ispezioni future, effettuare delle valutazioni strutturali in base al livello di deterioramento e stimare l'incremento di vita residua associabile alla tipologia di danneggiamento.

L'avvento dei modelli informativi *BIM* porta a completare i sistemi di gestione rendendoli degli ambienti intuitivi per via della possibilità di poter gestire tridimensionalmente l'intero manufatto e poterlo interrogare in ogni singolo elemento assegnandogli delle caratteristiche puntuali. All'interno di questi ambienti è possibile immagazzinare gli esiti delle visite ispettive ed effettuarne una restituzione grafica con l'implementazione e lo studio di nuovi protocolli. I sistemi di monitoraggio permanente possono essere implementati nei modelli introducendo degli elementi puntuali caratteristici dove sono riconducibili informazioni sulla tecnologia impiegata e sulle rielaborazioni dei segnali provenienti dalla sensoristica installata sui ponti.

Lo studio di questa tesi porta ad analizzare tutti i tre macro-argomenti: studiando inizialmente la lettura esistente, assimilando le caratteristiche più importanti legate al monitoraggio strutturale e ai singoli sensori, ricreando un modello informativo di un ponte reale in fase di monitoraggio e riflettendo su cosa è necessario condividere all'interno delle piattaforme di gestione.

The safety of bridges and viaducts has become a priority since the tragedy of the Morandi Bridge with the need to make the infrastructures more safe by monitoring them. Thanks to the use of management systems or Bridge Management System (BMS) it is possible to build inventories and inspection databases. These are then used to predict future scenarios of deterioration. As a result of this process, it is possible to plan maintenance operations in an efficient way and have an optimal rehabilitation of the structure.

To better know about the structure, it is possible to rely on structural monitoring systems or Structural Health Monitoring (SHM). In recent years this technology has been extremely developed but it is in continuous development due to the lack of data management. Data can be handled by using innovative techniques focusing on artificial intelligence (AI) with the integration of Machine Learning to manage the high amount of data. The data acquisition system is able to capture millions of data by storing them in shared cloud platforms. Finally, the system will process and clean the data with the goal to make them readable by the inspector.

In addition to a day-by-day structural analysis, it is possible to reuse the same data to predict the behavior of the work by implementing algorithms dedicated to forecasting and deterioration models. This additional analysis is needed to plan future inspections, to carry out structural evaluations according to the level of deterioration and to estimate the increase of residual life associated with the type of damage.

The advent of BIM information models leads to complete the management systems making them intuitive environments. In fact, these are able to manage the entire element three-dimensionally and to interrogate it in every single element by assigning characteristics punctual. Within these environments it is possible to store the results of the inspection and make a graphical return with the implementation and study of new protocols. Permanent monitoring systems can be implemented in the models aswell. This is possible by introducing characteristic point elements with the information of the technology used and with the data coming from the sensors installed on the bridges.

The study of this thesis leads to analyze all three macro-topics: studying initially the existing reading, assimilating the most important characteristics related to structural monitoring and individual sensors, recreating an informative model of a real bridge in the monitoring phase and reflecting on what you need to share within the management platforms.



### 1. PREMESSA

Negli ultimi anni, in Italia, il settore delle infrastrutture si è concentrato sul tema riguardante la manutenzione di ponti e viadotti. La maggior parte di esse sono state costruite nel dopoguerra alla fine del conflitto sfruttando, come tecniche costruttive, il cemento armato con armatura lenta e pretesa grazie al costo inferiore rispetto all'acciaio e alla nascita di un gran numero di piccole imprese emerse nel settore. Ai giorni nostri, per la quasi totalità delle opere, non hanno subito degli interventi di manutenzione e questo ha comportato un deterioramento delle strutture stesse.

I casi più gravi, come il crollo avvenuto nel 2018 del Ponte Morandi, ha portato le amministrazioni e gli enti gestori a rivalutare l'importanza di una corretta gestione per garantire stabilità e sicurezza delle opere esistenti. Nel maggio 2020, l'Assemblea generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ha approvato le *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*, esse hanno lo scopo di fornire uno strumento avanzato, univoco e uniforme per gli specialisti e gestori introducendo un approccio di tipo generale, multilivello, multicriterio e multi-obiettivo. L'approccio a multi-obiettivo è giustificato dal numero elevato di infrastrutture definendo una *Classe di Attenzione* che specifica un ordine di priorità per le opere, in modo da poter intervenire prontamente per evitare eccessivi danni strutturali o, nel peggiore dei casi, collassi.

Per ogni infrastruttura, è necessario conoscere al pieno tutte le caratteristiche geometriche, morfologiche e strutturali affrontando delle indagini in situ o ricercando la documentazione storica in modo da comprendere al meglio l'effettiva condizione dell'opera, in modo da poter definire successivamente dei fattori di rischio che permetteranno, attraverso dei criteri definiti nella linea guida, di determinare la classe di attenzione della infrastruttura.

Per i ponti e i viadotti con una classe di attenzione elevata è necessario attuare preventivamente un sistema di sorveglianza e di monitoraggio. Esso comprende, oltre alla pianificazione di successive ispezioni periodiche o straordinarie, anche l'introduzione di sistemi di monitoraggio continuo, prove di carico statiche (in concomitanza di ispezioni straordinarie) e modelli predittivi di degrado strutturale. Gli ultimi permettono di comprendere il comportamento strutturale a breve e a lungo termine necessario per intervenire preventivamente sulla struttura.

In particolare, il monitoraggio strutturale o *Structural Health Monitoring (SHM)*, ha lo scopo di sviluppare sistemi autonomi in grado di monitorare in continuo permettendo di identificare non solo il danneggiamento strutturale, ma anche di capire come i danni si verificheranno nella struttura (analisi predittive). La criticità di questo sistema è legata al dato che viene acquisito dai sensori, molti di essi hanno una frequenza di campionamento molto elevata e seguono un andamento che è dipendente da fattori esterni (temperatura, umidità, transito dei veicoli, etc.), in virtù di questo problema, la maggior parte di essi vengono depurati o rielaborati da algoritmi dedicati. Per una



corretta analisi, non è necessario avere a disposizione tutti i dati, infatti, comporterebbero una quantità di file molto onerosa da immagazzinare ed analizzare, ma il dato utile al fine della manutenzione è una successiva sintesi tenendo solo in considerazione gli aspetti peculiari.

Conoscendo appieno tutte le informazioni fondamentali per un corretto monitoraggio e una adeguata manutenzione del ponte, si devono creare degli spazi dedicati dove l'ispettore ha la possibilità di interrogare le singole infrastrutture, assegnandole un *codice identificativo AINOP*, fornendo in questo modo uno strumento per ottimizzare le scadenze manutentive, conoscere l'infrastruttura e capirne le criticità. Il *Bridge Management System (BMS)* è un sistema di gestione dei manufatti stradali, esso è basato su un database interno dove vengono catalogati tutti i documenti riguardanti l'opera, un sistema di procedure per definire i vari interventi di manutenzione o di adeguamento e i modelli di calcolo che permettono di predire le condizioni degli elementi, la stima dei costi e lo stato di sicurezza dell'opera.

Per visualizzare all'interno di questi sistemi il complesso struttura, si devono impiegare dei software esterni dove si ha la possibilità di creare dei modelli informativi BIM. Attualmente in commercio non ci sono molti applicativi *infraBIM*. Per lo sviluppo di questa tesi è stato impiegato un software *infraBIM Midas CIM* dell'azienda *CSPFea*, esso ha la peculiarità di: poter generare geometrie complesse, allineare automaticamente gli oggetti al tracciato del ponte (*Linear Parametric Technology*), creare delle gerarchie strutturali in modo da contestualizzare l'insieme e poter esportare il modello in formato dati aperti *IFC*.

L'esportazione nel formato dati aperto *IFC* è un'operazione essenziale, essa permette di poter lavorare su qualsiasi tipologia di piattaforma di gestione e di riportare le caratteristiche degli elementi dettate in fase di modellazione. Attualmente, analizzando il datamodel presente nel sito di *Buildings Smart* l'ultima versione ufficiale adottata è la *IFC4 ADD2 TC1* impiegata nel software di modellazione *infraBIM*, essa però non tiene conto delle caratteristiche delle infrastrutture, dei parametri necessari a descrivere il ponte e della sensoristica. Questo formato tratta quasi esclusivamente il mondo dell'edilizia. In letteratura sono presenti delle proposte per il potenziamento del formato dati ma, non essendo ancora pubblicate e in fase di sviluppo, è necessario trovare una possibile soluzione per poter integrare il datamodel in modo da interfacciare il modello informativo con la piattaforma di gestione.

Per lo scopo della tesi, è stato necessario analizzare nello specifico ogni singola tematica descritta e successivamente è stato possibile incrociare i vari ambiti per poter trovare delle possibili soluzioni interoperabili tra il mondo del *Bridge Management System*, basato su un modello informativo BIM, con lo *Structural Health Monitoring (SHM)*.

In questo paragrafo viene analizzato il flusso metodologico delle operazioni che hanno permesso di definire una possibile soluzione per una corretta gestione e manutenzione dei ponti. Esso è composto da sei macro-insiemi che si interfacciano attivamente tra di loro, è stato necessario comprendere:

- Preliminare ricerca bibliografica ed un'analisi di background culturale per quanto riguarda la gestione e la manutenzione delle infrastrutture;
- Struttura attuale dello standard IFC e cosa può essere impiegato o implementato;
- Analisi dello stato dell'arte attuale per i sistemi di monitoraggio con studio delle principali apparecchiature sensoristiche presenti sul mercato;
- Studio di un software dedicato all'infraBIM applicandolo ad un caso studio;
- Analisi del risultato di esportazione del modello completato nel formato IFC in software dedicati;
- Sperimentazione in una piattaforma di gestione.

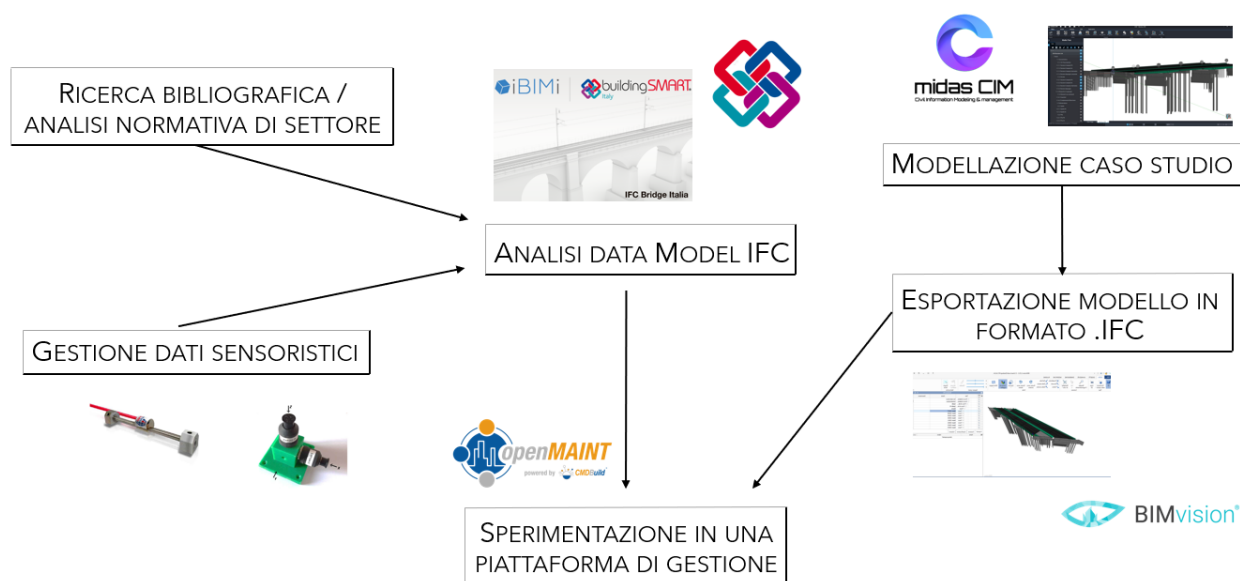


Figura 1 - Flusso Metodologico

## 2. LO STATO DELL'ARTE

Lo studio della presente tesi è stato un lavoro molto ampio, la difficoltà è stata nel collegare diversi argomenti con concetti differenti e concepirli correttamente.

Si è dovuto capire inizialmente cosa è presente in letteratura e come è stato affrontato durante gli anni, partendo dall'analisi delle norme tecniche e confrontandole con il BMS avvenuto in passato. Non sono stati individuati molti articoli essendo degli studi abbastanza moderni e ancora in fase di sviluppo, è stato necessario analizzare e scegliere con attenzioni quali informazioni sono essenziali.

Avendo compreso tutte le dinamiche legate alla gestione e manutenzione dei ponti, è stato necessario studiare le possibili componentistiche legate al monitoraggio strutturale delle infrastrutture. Inizialmente analizzando i sensori presenti nel caso studio adottato e successivamente generalizzandola in modo da avere una visione completa dell'insieme. Ogni sensore restituisce quantità e tipologie di dati differenti, essi sono influenzati da:

- *Tipologia e tecnologia implementata nei sensori*, ogni categoria restituisce informazioni differenti legate all'utilizzo adottato. Possono essere suddivisi in due macrocategorie: sensori statici e dinamici, la differenza sostanziale è il quantitativo di dati rilevato nel tempo;
- *Scopo del sensore*, ognuno di essi viene posizionato in punti strategici all'interno dell'infrastruttura. L'ubicazione del sensore è legata a una determinata caratteristica che si vuole analizzare;
- *Importanza dei dati acquisiti*: molti di essi hanno bisogno di post-processamento perché risultano essere dipendenti da fattori esterni. Per alcune tipologie è necessario combinare tra di loro più risultati estrapolati dai diversi sensori attraverso metodi matematici implementati in algoritmi di calcolo, in modo tale da ricavare un prodotto che sia interpretabile dall'ispettore. Essi sono dipendenti da *effetti maschera* (temperatura, transito dei veicoli, etc.) che rendono i risultati non comprensibili dalla mente umana e necessitano una successiva rielaborazione.

La massa di dati è troppo onerosa per implementarla all'interno delle piattaforme di gestione e renderebbe il sistema troppo pesante con necessità di macchine performanti e non adatte per un lavoro di ispezione, è stato necessario capire alla base quali dati sono realmente utili. Attraverso algoritmi dedicati per la normalizzazione dei dati e la definizione di *soglie di alert* è possibile attivare dei sistemi di controllo dinamico che permettono di avvisare, in tempo reale, l'ente gestore predisposto e definire una verifica sugli elementi.

Sapendo tutto quello che è indispensabile condividere all'interno di ambienti di lavoro, è necessario capire come poter implementarci le conoscenze studiate, per far ciò si fa ricorso al datamodel di IFC. Inizialmente è stato necessario fare un'analisi bibliografica mirata sulle infrastrutture ed analizzare le versioni attuali ufficiali cercando di capire quello che è presente, successivamente introdurre quello che è assente dandogli un senso logico.

Avendo acquisito tutte le conoscenze precedentemente descritte si è potuto implementarle ad un caso studio reale. L'infrastruttura analizzata è il Ponte sul fiume Brenta in carreggiata direzione

Ovest del tratto autostradale A4 Padova – Venezia, essa sarà soggetta all'installazione di un sistema di monitoraggio dinamico e statico. Inizialmente sono state fornite tutte le documentazioni storiche, le campagne di indagini sperimentali ed il progetto di realizzazione del sistema di monitoraggio.

Successivamente, dopo aver compreso la storia del ponte e la composizione strutturale, ci si è affiancati presso l'azienda *CSPFea*, società responsabile per l'Italia della distribuzione e supporto di prodotti software dedicati al settore AEC, svolgendo un tirocinio. Durante questa esperienza è stato necessario impiegare un nuovo applicativo specifico chiamato *Midas CIM* dedicato all'ambito dell'infraBIM. Essendo da poco in commercio e non trovando dei tutorial specifici per il caso assegnato, si è svolto uno studio specifico accompagnato dal tutor aziendale, sulle potenzialità del software ed è stata modellata l'infrastruttura tenendo conto degli aspetti fondamentali strutturali.

Una caratteristica importante ed essenziale per il lavoro di tesi è stata la possibilità di esportare il modello in formato *.IFC*, la versione attuale adottata nel programma è *IFC4 ADD2 TC1*. Essa nello specifico ha un database che si basa essenzialmente sugli edifici ma non sui ponti, questo comporterebbe dei problemi in fase di esportazione ma: facendo dei test, modificando i parametri di esportazione ed implementando i risultati in visualizzatori grafici specifici, l'esito risulta essere molto preciso ed attendibile. I visualizzatori adottati sono stati *BIMVision* e *FZKViewer*.

### 3. ANALISI IN LETTERATURA

L'analisi in letteratura si è sviluppata considerando singolarmente i macro-argomenti descritti in precedenza e successivamente ricercando documentazione specifica riguardante temi inerenti. È stata impiegata la seguente metodologia:

- consultazione di siti dedicati alla catalogazione e alle pubblicazioni scientifiche;
- ricerca delle normative di settore;
- analisi di siti web specializzati con fonti.

Per la gestione e manutenzione dei ponti, oltre a seminari specifici e saggi di settore, l'analisi si è concentrata sullo studio della *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*, essendo l'unico documento ufficiale approvato. L'analisi del background culturale, essendo un argomento in fase di sviluppo, ha trovato riferimento essenzialmente ai *Sistemi per la gestione dei manufatti stradali della Provincia Autonoma di Trento*, dove trattano in modo esaustivo i criteri delle procedure del sistema ispettivo.

La letteratura legata al monitoraggio strutturale non sempre considera l'input finale dei dati ma si concentra sui possibili metodi di rielaborazione ed applicazioni di analisi strutturali. Per lo scopo di questa tesi non è necessario comprendere i concetti matematici legati agli algoritmi ma è fondamentale capire cosa deve essere condiviso ad un ispettore, pertanto ci è riferiti a: casi studio reali, articoli di settore, studio delle schede tecniche dei prodotti e consulenza tecnica presso l'azienda *Expin*.

Per l'analisi del formato dati aperto IFC, inizialmente si è svolto uno studio in letteratura ricercando delle possibili pubblicazioni per l'ambito delle infrastrutture. Purtroppo, la maggior parte di esse consideravano aspetti riguardanti l'edilizia o informazioni non adatte per questo specifico studio. Successivamente è stato necessario esaminare il sito *buildingSMART Italia* per lo studio del data-model, accompagnato da specifica documentazione di settore in fase di sviluppo per comprendere cosa è già stato formato.

#### 4. RISULTATI, CONCLUSIONI E ULTERIORI SVILUPPI

Lo studio dei sistemi di monitoraggio ha portato a constatare che attualmente in commercio sono presenti una varietà innumerevole di tecnologie atte a monitorare in continuo tutte le grandezze attese dall'ispettore in fase di conoscenza della struttura. Per i nuovi sistemi le lacune, a livello di studi, non sono trascurabili e potranno portare ad un efficientamento a livello di costi e tempistiche non irrilevanti.

L'output atteso per ogni sensoristica è definito, ma sono carenti gli aspetti legati alla rielaborazione del dato e alle analisi per la creazione di modelli predittivi. In letteratura sono presenti studi legati essenzialmente all'impiego di accelerometri ma non vengono trattati in concreto i sensori statici anche se risultano essere quelli maggiormente impiegati nel monitoraggio strutturale. L'impiego di tecnologie estremamente sviluppate come l'Intelligenza artificiale accompagnata a processi Machine Learning sono in fase di sviluppo e risultano essere un tema molto considerato in questi ultimi anni ma in letteratura non sono presenti casi studio che portano a dei risultati concreti tali da poter essere implementati in piattaforme di gestione.

La modellazione con l'impiego di un software infraBIM dedicato esclusivamente ad impiego infrastrutturale ha dato dei risultati molto positivi sia in termini di resa grafica che scambio di informazioni tramite l'esportazione in formato .IFC. Esso è risultato di facile utilizzo, e per il caso studio trattato è risultato adeguato. Per la modellazione di modelli con tecnologie differenti all'acciaio e al calcestruzzo armato risulta essere carente e necessita un aggiornamento atto a coprire queste mancanze. L'esportazione in formato aperto .IFC ha dato degli ottimi risultati andandola ad analizzare in visualizzatori grafici *opensource*. Risulta di estrema importanza l'aggiornamento del formato aperto integrandolo con tutte le caratteristiche dedicate ai ponti, ai sistemi di monitoraggio e alle indagini in situ, essendo attualmente impiegato per ambito edilizio.

Lo studio dei dati applicabili alle piattaforme di gestione è risultato completo adeguandosi alle nuove Linee Guida sul monitoraggio dei ponti. Attualmente sono presenti differenti piattaforme che permettono di implementare i modelli ed eseguire delle prime catalogazioni dedicati ai ponti ma non si ha la possibilità di interrogare fisicamente gli elementi strutturali e i dati risultano catalogati solamente o nella piattaforma di gestione o all'interno del formato aperto. La possibilità di selezionare direttamente gli elementi ed avere tutte le informazioni desiderate può portare a diminuire le tempistiche relative allo studio ed ispezione dei ponti ed avere un database unico per ogni singola infrastruttura interrogabile anche da più dispositivi differenti.

In conclusione, attualmente è necessario focalizzarsi sullo studio di nuovi algoritmi atti a rendere capibile il dato della sensoristica in modo da poter interrogarlo *day-by-day* e creare dei modelli predittivi per studiare la vita utile degli elementi danneggiati e del complesso struttura. Comprendendo le informazioni dei sensori e integrando il formato .IFC per accogliere le lacune derivanti i ponti, è possibile studiare l'implementazione dei dati all'interno delle piattaforme di gestione in modo da renderle fruibili. L'integrazione di troppi dati non ottimizzati potrebbe portare a dei BMS troppo difficili da gestire computazionalmente e poco intuibili dagli ispettori prolungando i processi di consultazione e di reperimento dei dati.



# PRIMA PARTE





## PROCEDURE PER LA GESTIONE DELLA SICUREZZA DEI PONTI E VIADOTTI ESISTENTI

---

Le radici del patrimonio infrastrutturale italiano hanno avuto origine a metà del '900, quando nel secondo dopo Guerra le opere distrutte vennero ricostruite per la realizzazione di nuove reti di trasporto. Le norme sulle costruzioni, nel corso dei decenni, hanno avuto una notevole evoluzione legata agli eventi sismici presenti nel territorio, i quali hanno portato lo Stato a emanare delle direttive più dettagliate e stringenti nell'ambito della sicurezza strutturale.

Le tecniche costruttive e i carichi agenti sulle infrastrutture sono variati nel corso degli anni, rendendo necessari dei piani di manutenzione e sorveglianza in modo da scongiurare danneggiamenti eccessivi ed evitare costi esagerati per il ripristino dell'opera.

I primi capitoli sono un riassunto del background culturale passato, successivamente si andrà nel dettaglio analizzando la normativa vigente cercando di estrapolare tutto ciò che è indispensabile condividere per una corretta gestione dei ponti. Non tutti i dati risulteranno puramente essenziali, ma molti di essi serviranno per arrivare ad un risultato finale concreto.

### **1. CIRCOLARE MINISTERIALE LL PP 6736/61°**

La suddetta Circolare (Ministero dell'Interno 1967) è di fatto una delle prime leggi emanate dal Ministero dei Lavori Pubblici a contenere delle linee guida per il controllo delle infrastrutture. Essa impone agli enti gestori stradali e autostradali una sorveglianza periodica continua, valutandone le condizioni di stabilità con particolare attenzione: agli elementi strutturali, alle zone di posa delle fondazioni, alle scarpate e alla tipologia di terreno latistante, al fine di evitare cedimenti differenziali o scalzamento delle pile.

L'obiettivo principale è quello legato alla vigilanza e al controllo, definendo due tipologie di ispezione a seconda delle condizioni dell'opera. Il personale addetto alla manutenzione ispeziona i manufatti e le opere d'arte visivamente osservando l'eventuale presenza di anomalie e segnalando, presso gli Uffici interessati, i possibili danneggiamenti richiedendo un successivo controllo straordinario dell'opera.

Il documento finale redatto è intitolato come "Controllo periodico stabilità opere d'arte", affidato al Ministero dei lavori pubblici e all'ANA; esso contiene: dati dell'ispezione e dell'ispettore, disegni, fotografie, grafici, relazioni e una scheda riepilogativa della vita del manufatto.

La Circolare chiarisce e definisce la periodicità dei controlli, per questo è tuttora impiegata.

## **2. CIRCOLARE MINISTERIALE LL PP 220977 02/08/1980**

All'interno della Circolare (Ministero dell'Interno 1980) sono contenute per di più delle indicazioni sulla progettazione dei ponti stradali, considerando: i carichi viaggianti, le forze applicate esternamente come urti, vento, sisma e rischi di tipo geologico ed idraulico. Vengono definite le verifiche di sicurezza agli SLE e SLU. Si indica la necessità di prevedere in fase di progettazione ed esecuzione dispositivi atti ad assicurare l'ispezionabilità, ma non si nomina la possibilità di monitorare la struttura.

## **3. CIRCOLARE MINISTERIALE LL PP 34233 25/02/1991**

La seguente Circolare (Ministero dell'Interno 1991) è un aggiornamento delle precedenti, tuttavia contiene al suo interno un capitolo dove si tratta esclusivamente l'ambito della gestione dei ponti stradali. Gli enti gestori della rete sono invitati ad effettuare le operazioni di: vigilanza, ispezione, manutenzione ordinaria e straordinaria ed interventi legati al restauro, adeguamento o ristrutturazione dell'opera.

Le ispezioni devono prevedere controlli, da parte del personale incaricato, sulle parti strutturali dell'opera effettuando dei rilievi visivi con una frequenza prestabilita e documentando l'effettiva stabilità. In caso di eventi eccezionali si devono effettuare delle ispezioni di tipo straordinario per accertare l'insorgere di anomalie strutturali.

Al fine di preservare l'integrità dell'opera, si prevede di effettuare degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Il restauro, adeguamento o ristrutturazione sono raccomandati nel momento in cui si voglia aumentare o ripristinare la capacità portante della struttura. Suddetti interventi richiedono un'attenta progettazione attraverso: rilievi geometrici, indagini sui materiali con prove distruttive e no, indagini su fondazioni, elaborati di calcolo e ulteriori provvedimenti nel momento in cui se ne renda bisogno. Alla fine di queste operazioni, è obbligatorio effettuare un collaudo statico.

Rispetto alle precedenti normative d'epoca, la suddetta Circolare interviene sull'argomento della manutenzione, sottolineando la sua importanza nelle grandi strutture come ponti e viadotti.

#### **4. NORMA UNI 10985 “VIBRAZIONI SU PONTI E VIADOTTI” 2002**

La norma definisce i criteri per le prove e i rilievi dinamici indicandone: le tipologie di indagine e controlli, le attrezzature da utilizzare per le vibrazioni e per la loro misurazione e le tecniche appropriate per le differenti opere. Si applicano determinate procedure di identificazione dinamica a seconda della tipologia del ponte e dalle fasi di realizzazione (costruzione, collaudo, esercizio).

Prima di eseguire i seguenti test è necessaria un’analisi preliminare volta a studiare il comportamento del ponte su un modello per individuare: la tecnica di indagine appropriata, i sensori adatti e la loro posizione.

Le vibrazioni indotte sulle strutture sono un valido strumento, utilizzato anche ai giorni nostri, per valutare la risposta dell’infrastruttura sotto carichi dinamici.

#### **5. NORMA UNI/TR 11634 “LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE” 2016**

Il tema del monitoraggio strutturale è stato affrontato per la prima volta nella seguente Normativa, essa infatti definisce una linea guida dedicata a questa tematica individuando opportuni criteri di progettazione e determinando delle possibili metodologie di identificazione dello stato delle strutture.

Vengono descritti i vantaggi offerti dal monitoraggio strutturale, quali:

- Una conoscenza approfondita sul comportamento strutturale mediante la correlazione carichi-azioni e, conseguentemente la deformazione attesa;
- La possibilità di identificare modelli idonei, criteri di dimensionamento e una migliore valutazione della sicurezza;
- Una rapida segnalazione delle anomalie sulla risposta strutturale, dando modo di intervenire rapidamente con adeguati provvedimenti;
- La definizione di modelli predittivi legati all’impiego del monitoraggio in modo da conoscere o prolungare la vita ultima dell’opera e dei singoli elementi;
- Una raccolta di dati statici utili per studi futuri.

Il monitoraggio avviene in condizioni di esercizio, valutando specifici parametri che caratterizzano il comportamento strutturale come: proprietà fisico-meccaniche dei materiali, caratteristiche funzionali dei vari elementi strutturali e possibili deterioramenti dell’opera.

La presente Norma UNI ha due obiettivi fondamentali:

- Controllo delle condizioni in cui si trova la struttura rispetto ai possibili stati limite: essi sono progettati in modo da valutare costantemente il comportamento strutturale. Il dato confrontato con dei valori limite di soglia consente di intervenire tempestivamente sull'opera;
- Individuazione di un processo di degrado in atto attraverso un comportamento anomalo: esso deve essere affiancato da un modello accurato che riproduca i possibili meccanismi, confrontandoli con quelli rilevati dai sensori. In questa situazione l'obiettivo è quello di osservare l'evoluzione dei diversi parametri senza un confronto con dei valori limite.

Ogni opera richiede uno studio approfondito prima di poter progettare un sistema di monitoraggio su misura. Esso è dato da differenti fattori legati: all'importanza della struttura nel suo complesso, le condizioni geologiche ed ambientali, la complessità ed il grado di innovazione della infrastruttura e l'effettiva affidabilità del monitoraggio legata anche ad un'analisi costi-benefici. Gli obiettivi finali del monitoraggio, quindi, sono stabiliti tenendo conto delle disponibilità economiche e le prestazioni desiderate. I parametri fondamentali tengono conto di: differenti indici legati al danno, alla prestazione e alla vita residua secondo una classificazione del danno.

Come riportato nelle Circolari precedenti, affinché si abbia un controllo completo della struttura, esso deve essere accompagnato da ispezioni e indagini mirate, tuttavia, è raramente possibile conoscere dettagliatamente la struttura senza l'ausilio di attrezzature sofisticate e complesse. Per questo motivo è necessario individuare un numero ridotto ma adeguato di grandezze da monitorare, evitando ampie reti di sensori.

La norma descrive le modalità di acquisizione dei dati per ogni tipologia di sensore valutando: frequenze di campionamento, la periodicità di acquisizione e i requisiti di sincronizzazione dei segnali.

Il progetto di massima, descritto precedentemente, è seguito da un progetto esecutivo, il quale specifica l'architettura del sistema con tutte le componenti software e hardware. Per avere un corretto sistema di monitoraggio è necessario installare adeguatamente i sensori, gestirli ed avere una manutenzione periodica per evitare guasti inattesi.

Nella Norma sono contenute delle indicazioni sul monitoraggio a seconda che si tratti di strutture di nuova costruzione o esistenti e, come in appendice sono illustrati alcuni esempi applicativi.

## 6. DECRETO GENOVA 19/11/2018

Il Decreto Genova (Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 2018), pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 19 Novembre del 2018, pur non essendo una Normativa per le costruzioni, è un traguardo importante nella storia italiana per la salvaguardia delle grandi opere. Negli ultimi anni l'Italia è stata sede di numerosi crolli strutturali, infatti, il patrimonio infrastrutturale è caratterizzato da opere con età superiore ai 50 anni, progettate con Normative ormai superate e molte di esse assenti di ispezioni e manutenzioni costanti.

Il Decreto contiene informazioni riguardo il monitoraggio strutturale delle opere pubbliche introducendo la tecnologia 5G ed utilizzando strumentazioni più innovative. Il Ministero ha l'obbligo di adottare piani straordinari per opere con maggiori criticità, individuando degli ordini di priorità in base alla pericolosità territoriale e di vulnerabilità.

Per poter gestire in modo corretto e coerente il seguente processo, è stata introdotta l'istituzione ANSFISA<sup>1</sup> (art.12), Agenzia Nazionale per la sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali, la quale ha il compito di redigere un piano nazionale per l'adeguamento e lo sviluppo delle infrastrutture stradale ed autostradali, al fine di garantirne la sicurezza. In parallelo all'ANSFISA è stato creato un archivio informatico nazionale delle opere pubbliche (AINOP<sup>2</sup>), al quale si identifica ogni opera pubblica con un codice; esso fa riferimento: ai dati tecnici, lo stato e il grado di efficienza, l'attività di manutenzione ordinaria e lo stato dei lavori.

---

<sup>1</sup> Portale ANSFISA: <https://www.ansfisa.gov.it>

<sup>2</sup> Portale AINOP: <https://ainop.mit.gov.it/portale/#/>

## 7. LINEA GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO, LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI, 17/10/2020

Le Linee Guida (Consiglio Superiore dei lavori Pubblici 2020a) trattano la gestione della sicurezza dei ponti e viadotti esistenti, essa è composta da tre macro-procedure: censimento e classificazione del rischio, verifica della sicurezza e attività di sorveglianza e monitoraggio. L'approccio si basa su un metodo multilivello, visto il numero e la complessità delle opere presenti sul territorio italiano, partendo dal censimento delle stesse fino alla determinazione della classe di attenzione sulla quale si otterranno delle informazioni per eventuali procedure più dettagliate.

Il metodo si sviluppa su sei livelli differenti, aventi gradi di approfondimento e complessità crescenti:

- *Livello 0*: censimento di tutte le opere e delle loro caratteristiche principali mediante la raccolta di documentazione ed informazioni disponibili;
- *Livello 1*: esecuzione di ispezioni visive e rilievi speditivi al fine di individuare lo stato di degrado e le caratteristiche geo-morfologiche ed idrauliche dell'area;
- *Livello 2*: determinazione della classe di attenzione attraverso i parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione ricavata elaborando i risultati ottenuti dai livelli precedenti;
- *Livello 3*: valutazioni preliminari per l'esecuzione di verifiche accurate di livello 4;
- *Livello 4*: esecuzione di valutazione accurate secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti (NTC 2018);
- *Livello 5*: riservato esclusivamente ai ponti con significativa importanza all'interno della rete dove è necessario svolgere delle analisi più sofisticate.

Dal livello base e salendo, il grado di onerosità delle indagini e delle analisi aumentano, ma il numero di infrastrutture da analizzare si riduce. Viene riportato in seguito uno schema sintetico delle attività sopra citate presente nelle Linee Guida.

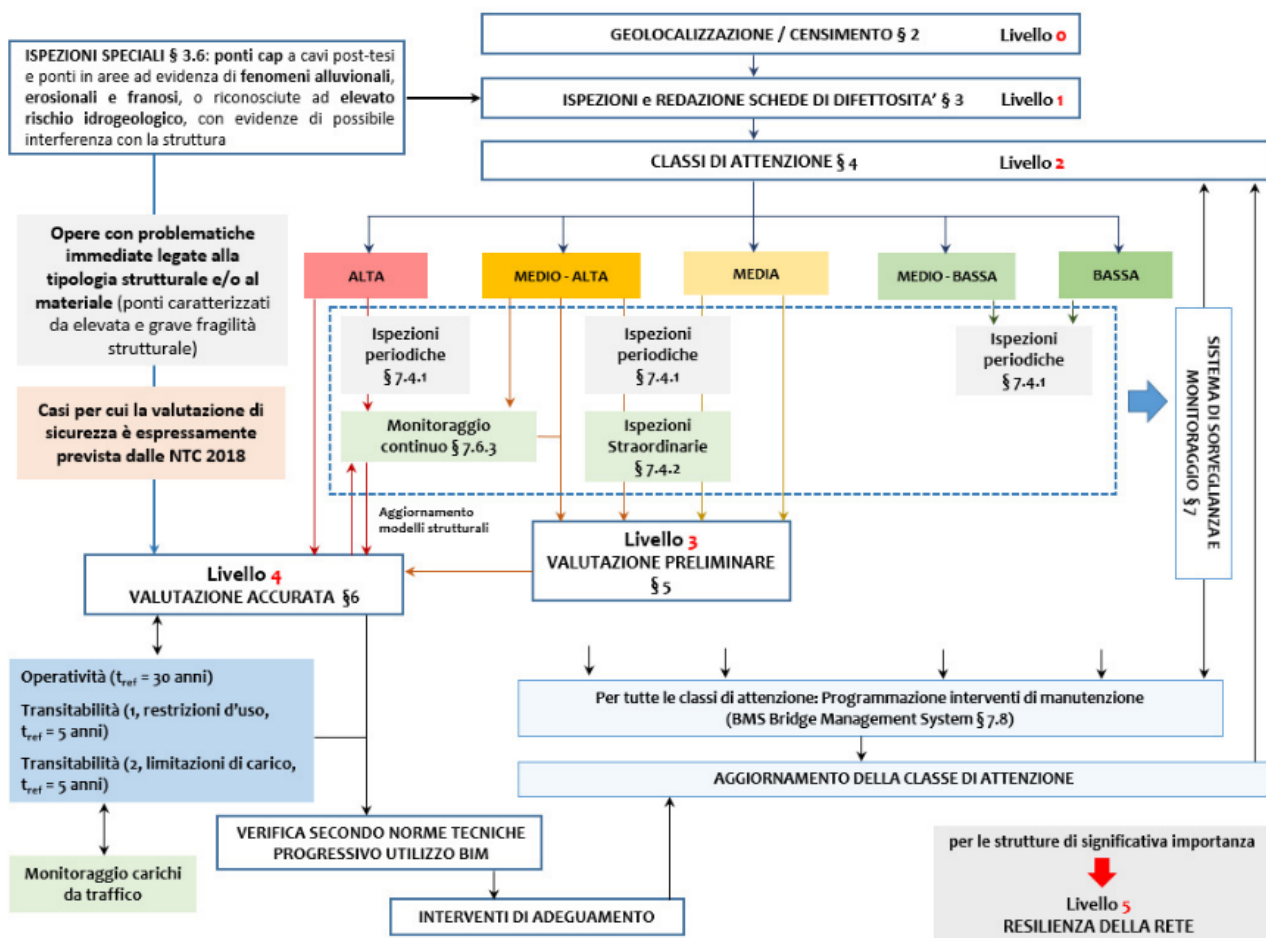


Figura 2 - Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi (Consiglio Superiore dei lavori Pubblici 2020°)

Il Livello 2 rappresenta il fulcro centrale dell’approccio, esso consente di assegnare ad ogni ponte o viadotto una classe di attenzione propria classificandoli, in funzione dei fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, in cinque categorie:

- *Classe di attenzione Alta*: è necessario avviare nell’immediato delle valutazioni accurate (livello 4) implementando, oltre a dei successivi approfondimenti sulle caratteristiche strutturali e geotecniche attraverso ispezioni periodiche ordinarie o straordinarie, un modello strutturale accompagnato da sistemi di monitoraggio periodici o continui. Esso ha il compito di valutare in continuo il comportamento dell’infrastruttura e permette di poter intervenire preventivamente in caso di instabilità;
- *Classe di attenzione Medio – Alta*: sono previste delle valutazioni preliminari (livello 3) con ispezioni ordinarie e l’applicazione di sistemi di monitoraggio periodico, se necessario, ispezioni straordinarie. Nella situazione in cui si evidenzino dei fenomeni evolutivi negativi con conseguenti problematiche, occorre effettuare delle valutazioni accurate (livello 4);
- *Classe di attenzione Media*: occorre eseguire delle valutazioni preliminari (livello 3) ed ispezioni periodiche ordinarie con possibili ispezioni straordinarie nel caso di fenomeni di degrado in rapida evoluzione. I sistemi di monitoraggio e le valutazioni accurate



(livello 4) sono stabiliti dagli enti proprietari e/o gestori riclassificandoli nella classe Medio – Alta;

- *Classe di attenzione Medio – Bassa*: non sono previste analisi supplementari rispetto a quelle già eseguite nella fase iniziale ma è doveroso l'esecuzione di ispezioni periodiche frequenti;
- *Classe di attenzione Bassa*: non sono previste analisi supplementari, è necessario pianificare delle ispezioni periodiche.

All'interno del documento ufficiale sono presenti anche dei cenni riguardanti la valutazione della rilevanza trasportistica e dei relativi impatti socioeconomici, essi non sono considerati all'interno di questo studio di tesi.

### 7.1. LIVELLO 0 – CENSIMENTO DELLE OPERE

Il processo del censimento consiste nel catalogare tutte le opere presenti sul territorio, in modo da conoscere il numero reale di strutture da dover gestire e le loro caratteristiche principali. Esse vengono suddivise in macro-classi, in modo da individuare un ordine di priorità utile per programmare le ispezioni visive in situ ed avviare successivi processi.

Le informazioni disponibili che vengono raccolte dal censimento, sono sintetizzate e documentate all'interno della *Scheda di censimento di Livello 0*<sup>3</sup> (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 2020a).

Essa è composta da sezioni che possono essere compilate direttamente dall'ispettore e può essere sintetizzata in cinque macro – argomenti:

- Informazioni di carattere generale;
- Dati geomorfologici riguardanti le caratteristiche più generiche, la classificazione dei collegamenti e d'uso stradale;
- Tipologia strutturale con una descrizione degli elementi costituenti principali;
- Descrizione degli interventi strutturali eseguiti, di manutenzione, ispezioni pregresse e possibili sistemi di monitoraggio;
- Documentazione progettuale dell'epoca.

Ogni infrastruttura, oltre il nominativo specifico del ponte, ha un codice singolare identificativo AINOP indispensabile per poterlo classificare ed individuare nel complesso della rete. Viene considerata la geolocalizzazione del sito, sia definendo la località e il grado di sismicità, ma anche introducendo le coordinate geografiche dei punti iniziali, finali e di mezzeria essendo, in molti casi, delle strutture con dimensioni longitudinali non trascurabili. È necessario indicare anche il proprietario, il concessionario e l'ente vigilante che possiede l'infrastruttura con i dati relativi del progettista, dell'anno di progettazione, costruzione o ristrutturazione.

---

<sup>3</sup> Scheda di censimento di Livello 0 (Allegato A), Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti

Le opere presenti sul territorio italiano, si devono adeguare a situazioni geomorfologiche differenti e ognuna di esse ha dei ruoli diversi all'interno del sistema di trasporto. Esse si possono classificare a seconda dell'uso stradale (autostrada o ferrovia, strada extraurbana principale, etc.) o dal tipo di collegamento da effettuare per sormontare una determinata tipologia di ostacolo (ponte su corso d'acqua, viadotto su zona edificata, etc.). I dati geomorfologici dipendono dalla morfologia del situ, essa infatti è differente a seconda della posizione del ponte nel territorio ed è possibile classificarla a seconda della pendenza del pendio in cui si trova.

Oltre alle informazioni generali e territoriali, si definisce la tipologia strutturale nel complesso presentandola in macrocategorie. Per alcuni elementi costituenti l'opera è richiesta una descrizione generale di alcune caratteristiche fondamentali. Le schede di censimento analizzano: spalle, pile, impalcato, giunti, sistemi di protezione e apparecchi di appoggio. Per ognuno di essi si definisce il materiale costruttivo, la tipologia e la geometria della sezione e il numero degli elementi.

Il reperimento della documentazione tecnica ed amministrativa è un'operazione importante per poter ricostruire la storia del ponte e le trasformazioni subite nel corso degli anni. L'importanza delle relazioni tecniche o dei progetti esecutivi, consentono una conoscenza sulle normative impiegate, sui materiali e sul pensiero dell'ingegnere in fase di modellazione. Il confronto tra gli elaborati grafici e le indagini in sito permette di verificare l'esattezza della realizzazione o le eventuali modifiche effettuate in corso d'opera. Le attività di manutenzione e di monitoraggio devono essere segnalate all'interno del documento per capire il grado di attenzione sull'opera ed eventuali risultati significativi nel corso degli anni. Tutti questi dati permettono di definire una classe di conoscenza del ponte.

## 7.2. LIVELLO 1 – ISPEZIONI VISIVE E SCHEDE DI DIFETTOSITÀ

Il Livello 1 prevede l'esecuzione di ispezioni visive su tutte le opere con una successiva catalogazione nel censimento effettuato nel Livello 0. Come accennato precedentemente, ha lo scopo di raccogliere tutte le informazioni circa le effettive caratteristiche geometriche e del sito di costruzione, valutarne la reale coincidenza e il grado di conservazione strutturale. Mediante un accurato rilievo fotografico, geometrico e dei principali fenomeni di degrado, si ha una descrizione oggettiva delle condizioni.

Oltre ad un accurato rilievo fotografico e geometrico delle dimensioni principali dell'opera, si svolge un rilievo dello stato di conservazione della struttura con lo scopo di individuare, evidenziare e segnalare, in apposite schede, i fenomeni di degrado ed i difetti presenti.

Le schede proposte sono differenziate per ogni tipologia di elemento costituente il ponte, materiale di realizzazione ed area sul quale sorge l'infrastruttura. Gli allegati sono:

- Allegato B. Scheda fenomeni di frana e idraulici;
- Allegato B. Scheda di valutazione dei difetti;
- Allegato C. Schede diffettologiche.

L' *Allegato B, scheda di valutazione dei difetti*<sup>4</sup> contiene un elenco, compilabile dall'ispettore, dei difetti tipici degli elementi strutturali facenti parte di una certa categoria di materiale. Essa è suddivisa in due macrosettori comprendenti: elementi con funzionalità strutturale e non strutturale.

Gli elementi strutturali vengono suddivisi in: spalle, pile, apparecchi di appoggio, giunti, piedritti, archi, travi e soletta. Ognuno di essi, ha assegnato i seguenti materiali: calcestruzzo armato, muratura, acciaio o metallo, calcestruzzo armato precompresso e legno.

Per tutti gli elementi strutturali si hanno dei dati in comune che corrispondono alle caratteristiche più generali:

- La localizzazione del ponte mediante l'indicazione toponomastica, la denominazione della strada servita e la rispettiva progressiva chilometrica;
- Gli elementi a cui è riferita (N), è importante per poter identificare con facilità la posizione nell'insieme strutturale;
- La data di ispezione ed il tecnico che l'ha svolta.

Successivamente è suddivisa in dodici colonne:

- *Codice difetto*, è un codice identificativo corrispondente a quello riportato nell' *Allegato C, scheda di rilievo e valutazione dei difetti*<sup>5</sup>. Esso è riferito ad uno specifico difetto in funzione del materiale su cui può manifestarsi; all'interno di questo allegato si riportano: le descrizioni dei difetti di degrado da rilevare in sede di ispezione, le possibili cause, i fenomeni ad esso correlati e i criteri per l'individuazione dei parametri da assegnare;
- *Peso "G"*, indica l'importanza del difetto nell'elemento strutturale. È un numero variabile da 1 a 5: difetti meno gravosi hanno un peso pari a 1 invece per quelli più importanti ha valore 5. I difetti con valori elevati avranno la necessità di essere valutati con dei rilievi più accurati, infatti, la loro presenza potrebbe essere indice di rilevanti e/o immediati problemi strutturali. Esso non è compilabile dall'ispettore, ma è un coefficiente dettato dall' *Allegato C, scheda di rilievo e valutazione dei difetti*.
- *Visto*; se l'elemento è stato oggetto o meno di indagine;
- *Estensione  $k_1$* , è una serie di tre valori e vanno da 0,2 a 1: difetti con una bassa estensione hanno un peso pari a 0,2, invece quelli più gravosi hanno valore pari a 1. Come per il peso "G", nell' *Allegato C*, sono presenti le indicazioni per assegnare ogni coefficiente;
- *Intensità  $k_2$* : hanno le stesse caratteristiche descritte nel coefficiente  $k_1$ ;
- *N° foto*, si riporta la numerazione digitale delle foto effettuate allo specifico difetto. Per ognuna di esse vengono catalogate, numerate e provviste di didascalia; riportanti la tipologia del difetto che si intende rappresentare e la specifica localizzazione nel complesso struttura;

---

<sup>4</sup> Scheda di valutazione dei difetti (Allegato B), Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti

<sup>5</sup> Scheda di rilievo e valutazione dei difetti (Allegato C), Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti

- *PS*, indica la possibilità di pregiudicare l'instabilità;
- *NA*, nel caso in cui il difetto non sia applicabile alla tipologia di manufatto ed all'elemento in esame;
- *NR*, se il difetto non si può rilevare mediante ispezione visiva;
- *NP*, se il difetto non è effettivamente presente;
- *Note*, spazio dedicato per riportare eventuali note ed osservazioni.

La combinazione tra le ispezioni visive in situ e la compilazione delle schede di difettosità permettono di individuare la presenza di elementi critici; cioè, quelli particolarmente soggetti ai fenomeni di degrado e i cui malfunzionamenti possono incidere significativamente sul comportamento strutturale globale del ponte.

#### Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

Codice difetto	Descrizione difetto	visio	G	Estensione K1			Intensità K2			N° foto	PS	NA	NR	NP	Note
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1						
Mur_1	Fessure orizzontali	<input type="checkbox"/>	3			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Mur_2	Fessure verticali	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Mur_3	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Mur_9	Macchie di umidità / risalita	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Dif. Gen_1	Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		



Figura 3 - Rappresentazione dei valori rappresentanti l'Allegato B - scheda di valutazione dei difetti

Terminata la compilazione della scheda, per quanto riguarda gli elementi strutturali principali, è necessario analizzare anche il danneggiamento per quelli accessori non strutturali. Essi vengono analizzati con un grado di dettaglio inferiore definendo le criticità fondamentali, si possono suddividere in:

- *Stato della pavimentazione*, si considerano i danni legati a stati fessurativi, presenza di dossi e dislivello dell'impalcato;
- *Cordoli*, se sono presenti o se hanno dei problemi legati al degrado;
- *Convogliamento delle acque*, anche in questo caso si richiede se sono presenti nell'infrastruttura e nel caso valutare il tipo di danneggiamento. Esso identifica: pozzetti intasati, scarichi corti, ostruiti e danneggiati;
- *Pali di illuminazione*, essi possono avere dei problemi legati all'ancoraggio alle superfici di posa o dei danneggiamenti. Essendo degli elementi soggetti a condizioni ambientali esterne, possono presentare un arrugginimento dei materiali;
- *Sottoservizi*, se sono presenti e nel caso se sono mal ancorati;
- *Marciapiedi*, in questa categoria si ha un maggiore grado di dettaglio. Bisogna analizzare se il marciapiede è assente o presente e nel caso valutare se è sormontabile oppure no. Determinata la tipologia, essa si suddivide catalogando i problemi legati alla: tipologia costruttiva dell'elemento, grado di danneggiamento, presenza di elementi ossidati, presenza di cattivo ancoraggio ed altezza dell'elemento.

Ultimate le ispezioni sulla struttura e la compilazione della scheda di valutazione dei difetti, i tecnici sono chiamati a valutare la presenza di potenziali eventi franosi e/o alluvionali.

L' *Allegato B – Scheda “Frane e idraulica”*<sup>6</sup>, contiene tutte l'informazione necessarie all'ispettore per valutare i fattori primari e secondari atti a definire la Classe di Attenzione. Per la parte relativa alle frane, è correlata alle tre componenti di: pericolosità/suscettibilità, vulnerabilità ed esposizione. L'analisi approfondita di questa tematica ha di scarso interesse, in quanto tutte le informazioni andranno a concentrarsi nell'ambito del GIS<sup>7</sup>, essendo caratterizzanti del territorio e non della struttura.

### 7.3. LIVELLO 2 – ANALISI DEI RISCHI RILEVANTI E CLASSIFICAZIONE SU SCALA TERRITORIALE

Il livello 2 è il fulcro dell'intera analisi, in quanto permette di determinare il rischio di ciascun ponte. Attraverso una stima semplificata e speditiva dei fattori di “rischio”, si ha la stima in modo approssimato, della Classe di Attenzione (CdA). Essa è utile per la definizione di un ordine di priorità per approfondimenti delle indagini/verifiche/controlli, ma anche per programmare interventi manutentivi o strutturali.

Come descritto in precedenza, la Linea Guida prevede cinque Classi di Attenzioni in ordine di priorità:

- Classe Alta;
- Classe Medio – Alta;
- Classe Media;
- Classe Medio – Bassa;
- Classe Bassa.

Le categorie di rischio considerate rilevanti sono: strutturale e fondazionale, sismico, frane ed idraulico; ad ognuno di essi è associata una CdA. Per ogni tipologia di rischio si individuano dei fattori primari e secondari e se ne calcola: la vulnerabilità, la pericolosità e l'esposizione.

Determinate tutte le classi di attenzione per ogni tipologia di rischio, deve conseguire la valutazione di un parametro unitario che permetta di avere un indice globale. Esso è la combinazione delle CdA attraverso l'impiego di tabelle dove, all'interno di esse, sono riportati negli assi le rispettive classi di attenzione: sismica ed idraulica e frane, con al loro interno il risultato finale complessivo.

I passaggi intermedi, per la determinazione della classe globale, non sono importanti per il processo della tesi; infatti, non è di nostro interesse avere tutti i valori dei rischi ma per una corretta gestione della struttura ponte, è fondamentale conoscere solo l'output finale di questo processo, cioè la classe di attenzione globale.

### 7.4. LIVELLO 3 – VALUTAZIONE PRELIMINARE DELL'OPERA

Il livello 3 valuta la qualità e la tipologia dei difetti rilevati al livello 1, analizzando nel dettaglio eventuali problematiche constatate.

---

<sup>6</sup> Scheda Frane ed Idraulica (Allegato B), Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti

<sup>7</sup> Geographic Information System (GIS): sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, registrazione, analisi, visualizzazione, restituzione, condivisione e presentazione di informazioni derivanti da dati geografici.

## 7.5. LIVELLO 4 – VERIFICA ACCURATA

L'obiettivo del livello 4 è di determinare il livello di sicurezza del ponte. Esso avviene stabilendo se l'impiego della costruzione possa continuare senza interventi; se debba essere modificato o se sia necessario attuare interventi volti a migliorarne la sicurezza. Si definisce:

- *Adeguate*: se le verifiche secondo NTC18<sup>8</sup> utilizzando carichi e coefficienti sono soddisfatte;
- *Operativo*: se le verifiche secondo NTC18 sono verificate con riferimento di 30 anni di vita utile;
- *Transitabile*: se le verifiche secondo NTC18 sono soddisfatte considerando un intervallo temporale inferiore in cui si limitino i carichi transitanti o si restringa l'uso del ponte.

Questo paragrafo è pieno di concetti fondamentali per le verifiche strutturali dell'infrastruttura. A livello di condivisione dei dati, almeno come prima analisi, risulta essere più speditivo per un ispettore capire la condizione effettiva del ponte non il singolo dettaglio, definendo i tre parametri precedentemente descritti. L'introduzione di informazioni aggiuntive porterebbe un ulteriore sovraccarico di dati che appesantirebbe la piattaforma digitale.

## 7.6. SISTEMA DI SORVEGLIANZA E MONITORAGGIO

L'ultimo capitolo della Linea Guida riporta: le indicazioni, i criteri e i requisiti minimi delle procedure per pianificare ed effettuare le attività di gestione della sicurezza strutturale dei ponti esistenti. Esse si compongono in: sorveglianza, controllo, ispezione e monitoraggio.

Le ispezioni periodiche ed il monitoraggio strutturale hanno lo scopo di consentire la valutazione dello stato di condizione dell'opera in modo da poterne stimare: lo stato di danneggiamento istantaneo e l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di danno effettuando delle analisi predittive.

I sistemi operativi del sistema di sorveglianza e monitoraggio seguono una strategia "risk-based", cioè dipendente dalla Classe di Attenzione caratteristica del ponte. Esse comprendono:

- Ispezioni periodiche ordinarie o straordinarie;
- Indagini non distruttive e semi distruttive;
- Prove di carico statiche e rilievi della risposta dinamica;
- Monitoraggio strumentale;
- Algoritmi di analisi e interpretazione dei dati;
- Modelli rappresentativi del comportamento reale;
- Indici dello stato di condizione e modelli di degrado;
- Basi dati informatiche.

---

<sup>8</sup> Norme tecniche per le costruzioni (NTC18)

Le ispezioni periodiche ordinarie devono essere eseguite con frequenza minima in funzione della Classe di Attenzione e a seconda se sono stati effettuati negli anni degli eventi di ispezione. Esse vengono suddivise in:

- Tipo 1: strutture già inserite in un sistema di sorveglianza conforme;
- Tipo 2: ponti o viadotti nuovi o già in esercizio da diversi anni, ma per le quali non siano state eseguite delle ispezioni periodiche.

<i>CDA -</i>	<i>Bassa</i>	<i>Medio - Bassa</i>	<i>Media</i>	<i>Medio-Alta</i>	<i>Alta</i>
<b>Frequenza Opere "Tipo 1"</b>	Biennale	18 mesi	Annuale	In funzione del monitoraggio o semestrale	In funzione del monitoraggio o semestrale
<b>Frequenza Opere "Tipo 2"</b>	Annuale	9 mesi	Semestrale	In funzione del monitoraggio o trimestrale	In funzione del monitoraggio trimestrale

Figura 4 - Frequenza minima delle ispezioni ordinarie

Esse devono essere condotte visivamente e con l'ausilio di strumentazione atta a verificare la presenza di difetti, fotografandoli e menzionando le problematiche riportandoli nelle apposite piattaforme di gestione. Se si effettuano delle riprese con droni o mezzi teleguidati o robotizzati, l'informazione del dato deve essere geolocalizzata e referenziata geometricamente rispetto all'elemento e l'estensione del difetto deve essere misurabile.

Le ispezioni straordinarie hanno lo scopo di acquisire informazioni utili ad approfondire la conoscenza dei fenomeni di degrado, sui difetti evidenziati dalle ispezioni ordinarie, e della condizione strutturale dell'opera. Esse devono essere eseguite non oltre i 60 giorni da quando ne venga nota la necessità nel momento in cui il danno ha un'evoluzione negativa. In ogni caso devono avvenire non oltre i 5 anni dalla precedente ispezione per manufatti di Classe di Attenzione Bassa o Medio – Bassa e non oltre 2 anni negli altri casi. Come per le ispezioni ordinarie, i rapporti relativi agli elementi indagati, devono essere documentati e resi accessibili nelle piattaforme di gestione.

In concomitanza con le ispezioni di tipo straordinario, è possibile effettuare delle prove di carico statico e rilievi della risposta dinamica. Esse hanno un triplice scopo: confrontare i valori ricavati con i risultati elaborati dai modelli analitici, aggiornare i parametri dei modelli con i risultati dati dalle prove per renderli aderenti al comportamento reale della struttura e utilizzarli per poter interpretare eventuali anomalie riscontrate nel caso delle ispezioni o monitoraggio strutturale. Essendo dei dati maggiormente utilizzati in modelli analitici, l'output finale riguarderà soltanto una scheda in formato file dove saranno presenti tutte le informazioni.

Il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) ha lo scopo di identificare stati di danno strutturale in maniera precoce, consentendo una tempestiva segnalazione di problematiche nel momento o prima che possano verificarsi. Sono dei sistemi composti da reti di sensori, gestiti da sistemi hardware/software che permettono di acquisire dati, come deformazioni ed accelerazioni, e rielaborarli in modo automatico o semi automatico. Questo argomento verrà trattato approfonditamente nei capitoli successivi.

I modelli di degrado o *lifetime* sono dei modelli prognostici e rappresentano l'andamento nel tempo dell'indice dello stato di condizione. Esso rappresenta la misura dello stato di un determinato elemento calcolato tenendo conto del: peso  $G$ , intensità  $k_2$  e estensione  $k_1$  di ogni singolo danno. Questo modello viene impiegato essenzialmente per consentire una previsione dell'evoluzione del degrado e per ottimizzare la pianificazione degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. A seconda dell'indicatore utilizzato si possono riferire al singolo elemento o al complesso struttura.

Combinato con un monitoraggio strutturale, è possibile prevedere il comportamento del ponte anche a lungo termine; la variazione dei parametri permette di creare delle curve di predizione. Nel caso il dato acquisito risulta essere tanto discostante rispetto al modello di degrado, questo può implicare un grado di deterioramento maggiore con una successiva valutazione da parte dell'ispettore sull'effettivo degrado dell'elemento.





## MONITORAGGIO STRUTTURALE – STRUCTURAL HEALT MONITORING (SHM)

---

*“Le metodologie di monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) si basano sull’installazione per periodi di tempo abbastanza lunghi (diversi mesi o anni) o per l’intera vita operativa di una struttura, di reti di sensori gestiti da sistemi hardware/software che consentono di acquisire i dati provenienti dai sensori e di elaborarli in modo automatico o semiautomatico, identificando attraverso opportuni algoritmi la presenza di malfunzionamenti”*(Consiglio Superiore dei lavori Pubblici 2020a)

La seguente definizione, richiamata dalle Linee Guida precedentemente discusse, illustra i concetti fondamentali del monitoraggio strutturale. L’idea di fondo del monitoraggio è quella di sviluppare dei sistemi autonomi che siano in grado di monitorare in continuo un’opera, permettendo l’ispezione da remoto e il rilevamento immediato dei danni con il minimo intervento umano. Esso non si pone solamente l’idea di identificare il danneggiamento nella struttura, ma anche di capire come i danni si verificheranno in modo da poter stimare quale sia la vita utile rimanente e sviluppare un piano manutentivo che consenta di incrementare la durata dell’opera.

I sistemi SHM sono in rapida ascesa, in quanto sono numerosi i progetti dove si realizzano delle nuove infrastrutture con sistemi sensoristici in fase di progettazione, rendendo il complesso ponte una sorta di “organismo digitale”. Grazie all’impiego della *computer vision*<sup>9</sup>, accompagnato con sensori e telecamere intelligenti, integrato con algoritmi di *intelligenza artificiale (IA)*<sup>10</sup> avanzati, sarà possibile analizzare quello che accade istantaneamente e prevenire danni e usure negli elementi. La macchina, avendo tutte queste informazioni, può allertare il proprietario dell’opera in modo tale da poter intervenire immediatamente e valutare la possibile situazione.

Il monitoraggio strutturale, come analizzato negli articoli di settore di Mita(Mita 1999) e Moss&Matthews(Moss and Matthews 1995), non si concentra esclusivamente sulle strutture nuove o esistenti, ma può essere impiegato anche per analizzare altri scenari:

- Monitoraggio di strutture interessate da lavori esterni;
- Monitoraggio da effettuarsi durante lavori di demolizione;
- Strutture soggette a spostamenti a lungo termine, degrado del materiale e valutazione del fenomeno a fatica;
- Ciclo di feedback per migliorare la progettazione futura sulla base dell’esperienza;
- Valutazione dell’integrità strutturale successivamente ad un intervento sismico;
- Declino della costruzione e crescita delle esigenze di manutenzione;
- Spostamento verso una filosofia di progettazione basata sulla prestazione.

---

<sup>9</sup> Computer vision: simulazione della visione umana con tecnologie di intelligenza digitale.

<sup>10</sup> Intelligenza artificiale: è un insieme di tecnologie differenti che interagiscono per consentire alle macchine di percepire, comprendere, agire e apprendere con livelli di intelligenza simili a quelli umani.

Come si evince, i sistemi di monitoraggio, sono uno strumento indispensabile per valutare differenti situazioni, non solo per edifici o ponti, ma anche per grandi opere, come dighe, viadotti e gallerie. Oggigiorno, molte di queste opere hanno un'età prossima alla vita ultima stimata e sono progettate con delle normative oramai superate; un possibile collasso potrebbe portare a possibili perdite umane e conseguenze sociali ed economiche rilevanti essendo delle strutture strategiche. Questo comporta l'esigenza di controllare il comportamento strutturale attraverso strumentazioni digitali da poter interrogare continuamente, rispetto ad altri metodi che richiedono la presenza in situ.

L'ambito delle costruzioni civili, rispetto i campi meccanici o aeronautici, non ha la possibilità di automatizzare le strutture; esse vengono concepite in ambienti territoriali diversi e con metodologie differenti contraddistinguendo ogni singola struttura. Questa unicità, porta ad avere una progettazione degli apparati sensoristici dipendenti da caso a caso, con delle incertezze sull'efficienza e sull'affidabilità dei dati acquisiti. Per aumentare il rendimento è necessario effettuare un'accurata progettazione, valutando: tipologia dell'opera, possibili danneggiamenti in corso, grandezze misurabili estraibili, strumentazione da utilizzare, numero e posizione dei sensori.

## **1. ASSIOMI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE**

Accertata l'importanza del monitoraggio strutturale nell'ambito civile, è necessario partire dalle basi in modo da arrivare a comprendere appieno le tecnologie adottate ed i loro limiti. Nel corso degli ultimi anni, sono stati svolti differenti studi che hanno portato a definire i principi cardine e i rispettivi assiomi. Il termine *assioma* si impiega per rappresentare una verità fondamentale sui numeri reali di qualsiasi metodologia SHM, inoltre, quelli che vengono riportati in seguito potrebbero essere solamente alcuni ed è possibile ipotizzare che ve ne siano ulteriori.

Nel testo "*The fundamental axioms of Structural Health Monitoring*" (Worden et al. 2007), sono riportati, in forma compatta, tutti gli assiomi presenti in letteratura in modo tale da avere un testo facilmente visionabile e completo. Essi sono:

- *Assioma I*: tutti i materiali hanno difetti intrinseci,
- *Assioma II*: la valutazione del danno richiede un confronto tra due stati del sistema;
- *Assioma III*: identificare l'esistenza e la posizione del danno può essere fatto in una modalità di apprendimento non supervisionato, ma identificare il tipo di danno presente e la gravità del danno può generalmente essere fatto solo in una modalità di apprendimento supervisionato;
- *Assioma IV a*: i sensori non possono misurare i danni. L'estrazione delle caratteristiche attraverso l'elaborazione del segnale e la classificazione statistica è necessaria per convertire i dati dei sensori in informazioni sui danni;
- *Assioma IV b*: senza un'estrazione intelligente delle caratteristiche, più una misura è sensibile al danno, più è sensibile il cambiamento delle condizioni operative e ambientali;
- *Assioma V*: le scale di lunghezza e di tempo associate all'inizio e all'evoluzione del danno dettano le proprietà richieste del sistema di rilevamento SHM;

- *Assioma VI*: c'è un trade – off tra le sensibilità al danno di un algoritmo e la sua capacità di reiezione del rumore;
- *Assioma VII*: la dimensione del danno che può essere rilevata dai cambiamenti nella dinamica del sistema è inversamente proporzionale alla gamma di frequenze di eccitazione.

## 2. CONOSCENZA/CULTURA DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE

Definiti i concetti cardine dei SHM, possono essere applicati percorrendo infinite vie ma, per una massima efficienza ed un risultato ottimale, è opportuno comprendere l'attuale cultura e capire come applicarla in situazioni reali.

Per ottimizzare un qualsiasi tipo di sistema strumentale, è importante definire delle fasi operative in modo tale da adottare una strategia coerente con le tecnologie impiegate e compatibile con la tipologia strutturale. La qualità dei sensori, installati sulle strutture, deve avere dei requisiti minimi atti a garantire affidabilità e durabilità in fase di esercizio; inoltre, la quantità di dati da formulare dipende dalle caratteristiche del fenomeno che si vuole analizzare. Gli attributi descritti sono alcuni degli aspetti da tenere in considerazione e provano che, per installare un sistema di monitoraggio strutturale, è necessario una conoscenza approfondita sia della strumentazione utilizzata e sia del complesso infrastrutturale.

### 2.1. STRATEGIA NEL MONITORAGGIO STRUTTURALE

Il coordinamento iniziale per la strutturazione dei sistemi di monitoraggio è di cruciale importanza per una corretta manutenzione e gestione del danno, si possono sintetizzare quattro fasi distinte:

- *Valutazione operativa*: permette di inquadrare il problema e valutare quale sistema di rilevamento è adatto per poter analizzare un determinato danno. A monte, è necessario comprendere quali sono le criticità più rilevanti nel complesso strutturale e valutare gli aspetti economici che lo circondano. La creazione di un sistema molto complesso e dispendioso può produrre dei risultati analoghi ad un medesimo molto più semplice ed economico;
- *Acquisizione dei dati, normalizzazione e pulizia*: l'acquisizione dei dati dipende esclusivamente dal tipo di sensore impiegato e dall'hardware specifico del sistema; non è possibile quindi prevedere una generalizzazione. Il dato ricevuto dai sensori, risulta essere incomprensibile a prima lettera, è necessario fare un processo di normalizzazione e di pulizia in modo da renderlo leggibile e confrontabile con dei valori limite;
- *Selezione delle caratteristiche e compattazione delle informazioni*: l'idea è quella di sviluppare delle tecniche di riduzione dei dati compattando le informazioni, in modo tale da ridurre le dimensioni dei documenti e mantenere la precisione delle caratteristiche ai cambiamenti strutturali in presenza della variabilità delle azioni esterni di tipo ambientali o operative;

- *Sviluppo di modelli statistici per la discriminazione delle caratteristiche*: determinate tutte le caratteristiche essenziali, è necessario sviluppare degli algoritmi atti a quantificare lo stato del danno della struttura. È possibile che, nonostante il danno sia presente, non si riesca ad individuarlo o viceversa. Questo porta a una serie di problematiche riguardanti la sicurezza strutturale, infatti, esso può portare a due situazioni gravose: *falso positivo*, potrebbe causare dei problemi legati a periodi di inattività della struttura che possono indurre a problematiche economiche e alla mancata fiducia del sistema di monitoraggio, e *falso negativo* porterebbe alla mancata conoscenza della reale condizione dell'elemento.

## 2.2. REQUISITI NEL MONITORAGGIO STRUTTURALE

Per garantire un funzionamento ottimale nei sistemi di monitoraggio è opportuno, in fase di progettazione, tenere in considerazione alcuni accorgimenti atti a mantenere un corretto ed efficiente monitoraggio.

Un primo aspetto da tenere in considerazione riguarda le condizioni ambientali, infatti, le infrastrutture soggette ad interventi di monitoraggio si trovano in posizioni molto diverse tra di loro nel territorio, questo comporta la necessità di avere impianti adeguati ad ogni condizione climatica. Per garantire una protezione del sistema, l'assenza di rumore elettrici e la possibilità di raggiungere la strumentazione, è consigliato progettare preventivamente l'impianto tenendo in considerazione anche gli schemi dedicati ai cablaggi.

Allungato ed avviato il sistema di monitoraggio, i dati che vengono rilevati possono essere affetti sia da errori sistematici che da errori casuali. Si deve verificare, sia localmente che globalmente, il corretto funzionamento analizzando che le informazioni siano accurate e precise.

Per un ottimale affidabilità nel tempo, la manutenzione risulta essere di fondamentale importanza programmando delle ispezioni periodiche o verificando a distanza, attraverso degli alert, la possibile presenza di malfunzionamento nel sistema. Questo comporterebbe ad effettuare degli aggiornamenti nel complesso riparando o modificando le singole componentistiche.

## 2.3. TIPOLOGIE DI MONITORAGGIO STRUTTURALE

Come si è accennato precedentemente, il SHM non si focalizzano solamente su strutture nuove o esistenti, infatti, per alcune implementazioni strutturali non è necessario studiare dei sistemi atti a monitorare costantemente l'evoluzione dei danni nel tempo ma, sono importanti per valutare determinati comportamenti in periodi limitati. Si ha una distinzione in:

- *Monitoraggio a breve termine*, è una tipologia di rilevazione discontinua, adottando dei sensori che possono essere impiegati per periodi di tempo molto brevi in modo da ricavare delle informazioni puntuali (modifica dei fenomeni chimici di un materiale, etc.) o per interventi breve termine (demolizioni, risanamento, etc.);
- *Monitoraggio a lungo termine*, la seconda tipologia si adatta a sistemi permanenti con acquisizione dei dati per un periodo di tempo lungo. Vengono impiegati quando i

fenomeni di danno sono molto lenti (apertura di fessure, assestamenti di fondazioni, etc.) o si decide di analizzare il comportamento strutturale in modo da conoscere la struttura, prevedendo fenomeni nell'immediato o predicendo problematiche future;

La mole di dati associata ad un monitoraggio a breve termine risulta essere molto inferiore rispetto a quello a lungo termine, implicando dei sistemi di analisi dei dati più sofisticati e apparecchiature più performanti.

I fenomeni che si vogliono monitorare non necessariamente riguardano i singoli comportamenti degli elementi, nel caso si voglia studiare una struttura nella sua interezza si adottano dei *monitoraggi globali* (studio delle vibrazioni, modi di vibrare, etc.). Per quanto riguarda lo studio di danni localizzati sugli elementi (propagazione di fessure, freccia in campata, etc.) si impiegano i *monitoraggi locali*.

Un sistema di monitoraggio strutturale deve avere sensori in grado di monitorare le reali condizioni di impiego a seconda della variazione del fenomeno atteso. È possibile suddividerlo in:

- *Monitoraggio statico*, si intende valutare dei parametri variabili lentamente durante il periodo di osservazione; l'intervallo o periodicità di acquisizione risulta essere molto ampio e nella maggior parte dei casi si registra circa un dato all'ora. I fenomeni tipicamente analizzati possono essere legati alla temperatura, umidità, spostamento, rotazioni, etc.
- *Monitoraggio dinamico*, le grandezze dinamiche hanno delle informazioni molto ravvicinate (vibrazioni indotte dal transito dei veicoli, vibrazioni proprie del ponte, etc.), tipicamente vengono impiegate due differenti strategie. Nel primo caso si ha una *misurazione periodica*, il dato viene registrato ogni 12 o 24 ore con un periodo di acquisizione che varia dai 5 o 10 minuti a frequenze elevate (dipendenti dalle frequenze proprie del ponte, tipicamente 200 Hz); essa ha lo scopo di investigare le variazioni delle frequenze proprie degli impalcati al passare del tempo. Conoscendo l'impronta dinamica a lungo termine, si ha la possibilità di creare un andamento del normal funzionamento del sistema attraverso un processo di *training*<sup>11</sup> dei dati, il discostamento dall'inviluppo ci da informazioni sui possibili danneggiamenti. La seconda strategia consiste nel reperimento di dati al superamento di un *trigger*<sup>12</sup>, oltre il quale il sistema incomincia autonomamente ad acquisire il dato. Essa è importante per avere una mappatura su tutti gli eventi significativi ed impostando un contatore si ha la possibilità di tenerne conto. Quest'ultima metodologia viene impiegata a cavallo dei giunti autostradali e permette di analizzare la tipologia ed il numero di veicoli transitanti.

---

<sup>11</sup> Training: i dati acquisiti dai sistemi di monitoraggio sono influenzati da fattori esterni come temperatura o transito di mezzi pesanti. Un percorso di training consiste nell'acquisire i dati, per almeno due periodi stagionali, in modo da capire come il dato è influenzato dagli effetti maschera. Attraverso algoritmi di pulizia del dato è possibile ricondurli ad un singolo valore a meno di tolleranze.

<sup>12</sup> Trigger: sono dei valori soglia definiti dall'ispettore in fase di studio del modello.

## 2.4. ARCHITETTURA DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO

L' *architettura*<sup>13</sup> nei sistemi di monitoraggio è di tipo *distribuita*<sup>14</sup>; con un singolo sistema è possibile interfacciarsi con diversi elementi strutturali ma anche con macrostrutture differenti tra di loro, attraverso elementi fisici (sensori) che cedono informazioni su appositi sistemi di acquisizione. Essi vengono definiti *sistema SHM terrestre*, si interfacciano esclusivamente con apparati alloggiati sulle infrastrutture. Negli ultimi anni, sono state introdotte delle nuove tecnologie che adottano delle rilevazioni di tipo aereo impiegando satelliti (*inSAR*<sup>15</sup>) o mezzi volanti come aerei o droni, con lo scopo di monitorare le strutture ed il territorio limitrofo.

Per quanto riguarda la prima tipologia, essi possono essere impiegati per effettuare sia il monitoraggio statico e sia quello dinamico; l'architettura è composta da:

- Infrastruttura da monitorare;
- Sensori o attuatori;
- Sottosistema di acquisizione e concentrazione dei dati;
- Reti per il trasferimento dei dati;
- Sottosistema centrale di memorizzazione, elaborazione ed analisi centralizzata dei dati;
- Interconnessione con banche dati ed altri sistemi.

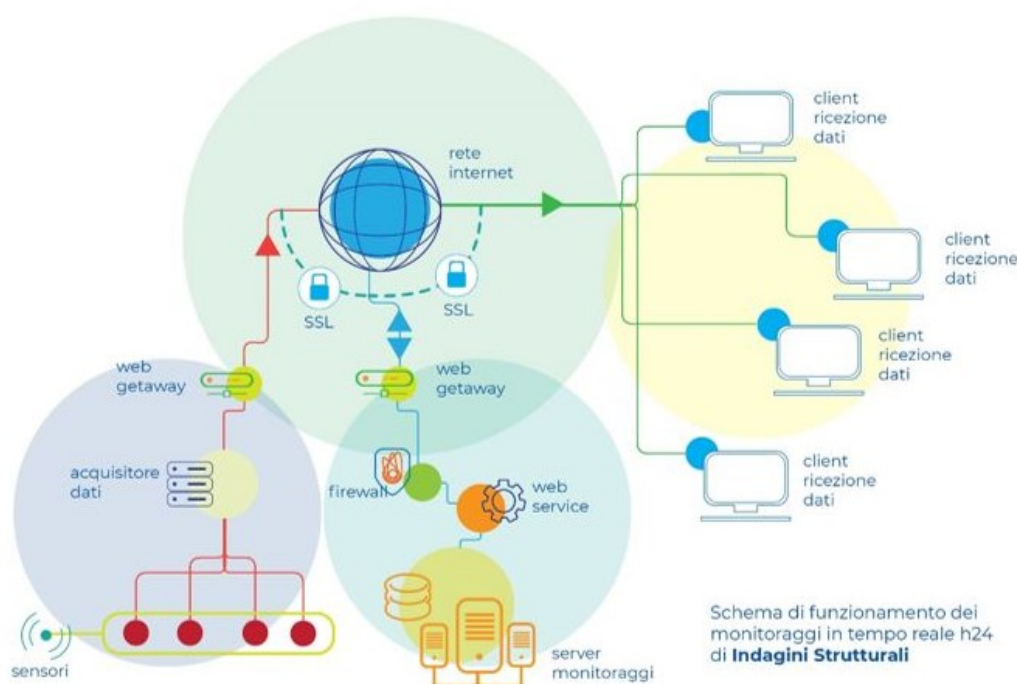


Figura 5 - Schematizzazione sistema di monitoraggio

<sup>13</sup> Architettura del sistema: la struttura topologico con cui sono connesse le diverse componenti di un sistema di monitoraggio.

<sup>14</sup> Distribuita: sistema costituito da un insieme di processi interconnessi tra di loro in cui le comunicazioni avvengono solo tramite lo scambio di opportune informazioni.

<sup>15</sup> InSAR: Interferometria Radar Terrestre

La tipologia di sensori da adottare è un punto significativo per garantire una adeguata conoscenza dell'opera. Nei capitoli successivi si tratteranno più nello specifico tutte le tipologie di sensori soffermandosi su: caratteristiche generali, tipologia di output atteso, ambito di interesse e tipo di condivisione attesa su piattaforme di condivisione.

Attualmente, nell'ambito dell'ingegneria civile, i sensori maggiormente utilizzati permettono di misurare grandezze come: deformazioni, spostamenti, tensioni, accelerazione e parametri ambientali. Ogni tipologia di sensore gode di caratteristiche differenti legate sia alle prestazioni, ma anche alla facilità nell'installazione e manutenzione; ovviamente la scelta è calibrata a seconda del grado di attenzione dell'opera e il budget richiesto. Un unico sistema di monitoraggio generalmente comprende diverse tipologie di sensori atti a ricavare differenti caratteristiche meccaniche nella struttura.

L'acquisizione dei dati grezzi proveniente dai sensori viene effettuata da dei *data-logger*<sup>16</sup> che hanno il compito di: demodulare il segnale in arrivo, memorizzare e condizionare i dati misurati. I segnali analogici in uscita direttamente provenienti dai sensori, vengono opportunamente convertiti in un linguaggio ingegneristico comprensibile atto ad essere analizzato e rielaborato nelle fasi successive.

Tutti i sensori possono essere collegati con il sistema di acquisizione mediante connessione cablata o attraverso una connessione wireless.

La connessione cablata costituisce la soluzione più vantaggiosa dal punto di vista economica, però essa può essere affetta da fenomeni elettromagnetici (EMI) che possono portare ad errori significativi di misurazione. Per ovviare a questo problema i cavi installati devono essere opportunamente schermati e si possono impiegare delle tecniche di segnalazione differenziale. Essi non devono in nessun modo subire dei danneggiamenti o tranciamenti nelle fasi stoccaggio e posizionamento. Nel caso di tecnologie a fibra ottica (FOS) non ci sono interferenze perché non sono presenti dato che sono immuni dai fenomeni EMI. Per quanto riguarda la connessione via wireless si hanno dei costi maggiori ed il dato risulta essere più lento ma è possibile impiegarle in strutture con maggiore estensione spaziale.

Una volta che i dati sono stati acquisiti all'interno dei data-logger, è necessario trasferire gli stessi attraverso delle reti che possono essere LAN/WLAN, MAN/WAN o altre soluzioni; in modo da poterli elaborare o analizzare in maniera opportuna. All'interno delle centraline di acquisizione vengono inseriti dei dischi rigidi in modo da avere un backup locale dei dati e sono forniti dei protocolli di cancellazione periodici in modo da non saturare la capienza della memoria. Il sito dove avvengono le elaborazioni e le analisi dei dati tipicamente non coincide con l'ubicazione della struttura, in modo da poter monitorare l'opera a distanza e non recarsi nel sito per l'acquisizione delle informazioni.

La fase successiva di elaborazione ed analisi dei dati avviene in maniera automatica attraverso algoritmi implementati in un computer. Essa rappresenta la parte operativa di tutto il sistema di monitoraggio, una volta che sono stati acquisiti e poi trasferiti, i dati vengono ripuliti dalle possibili

---

<sup>16</sup> Data logger: dispositivo utilizzato per la memorizzazione dei dati.



incertezze ed errori eliminando le informazioni ridondanti o indesiderate. È importante questa fase perché porta ad avere dei risultati rispecchianti lo stato di salute della struttura.

Nella maggior parte dei sensori, il dato che deve essere elaborato ed analizzato è strettamente influenzato da *effetti maschera*<sup>17</sup>. Essi condizionano il risultato non rendendo uniforme l'andamento nel tempo e in fase di consultazione viene molto complicato capire se sono presenti dei danni sulla struttura non avendo valori di riferimento. I fattori possono essere *noti*, come la temperatura e l'umidità che sono strettamente vincolate con i cicli stagionali, oppure *non noti*, come le azioni di esercizio indotte dai carichi veicolari in transito. A seconda della tipologia di sensore si possono stabilire due strategie per elaborare il dato:

- Per i monitoraggi statici e dinamici si deve collezionare, per un periodo di *training*, la normale risposta dell'opera almeno per un periodo stagionale in modo da poter pulire il dato conoscendo l'influenza degli effetti maschera nel tempo. Se non ci sono state variazioni significative delle grandezze, a due periodi differenti ricondotti a circa un anno di distanza, i dati tendono ad essere gli stessi;
- Per i monitoraggi dinamici si devono svolgere delle modifiche riguardanti il dato implementando più algoritmi. Lo scopo è quello di verificare l'invarianza delle deformate modali nel tempo oppure la non variazione della complessità del modo principale di vibrare;

Il primo metodo viene implementato se si ha necessità di analizzare un dato non immediatamente ma acquisendo dei dati per un periodo di tempo, nel secondo caso si ha un'analisi immediata analizzando i parametri modali ma in questa situazione è necessario implementare diversi algoritmi di calcolo. Successivamente, nei paragrafi dedicati ai sensori statici e dinamici, verranno descritti i seguenti processi più nel dettaglio.

Una volta che i dati sono stati rielaborati, è necessario interpretarli facendo un processo di diagnostica e prognostica, acquisendo delle informazioni che possono essere utilizzabili per il corretto funzionamento strutturale.

I dati infine devono essere archiviati per poterli riutilizzare in modelli predittivi o consultazione. Per ogni sensore, avendo degli output differenti, si deve ricorrere a dei sistemi di storage differenti dipendenti dal quantitativo di dato acquisito.

---

<sup>17</sup> Effetti maschera: sollecitazioni esterne che influenza il dato dei sensori e lo rendono non uniforme, possono essere variazioni climatiche, transito dei veicoli sull'impalcato, etc.

Il processo di monitoraggio ha inizio con l'installazione di sensori sull'involucro della struttura ed essi hanno la capacità di misurare una o più informazioni rilevanti sul comportamento strutturale trasformando le quantità misurate in segnali elettrici che possono essere digitalizzati e memorizzati.

I sensori più comunemente impiegati misurano grandezze come: accelerazioni, spostamenti, deformazioni, rotazioni ed effetti ambientali. Lo sviluppo delle tecnologie di riferimento in questi anni ha avuto una evoluzione esponenziale e attualmente sono infinite le possibili scelte inerenti alla sensoristica da poter introdurre all'interno del contesto infrastrutturale. I vari dispositivi differiscono tra di loro non solo per le grandezze fisiche capaci di misurare, ma per i principi fisici su cui essi si fondano. I sensori a fibra ottica (FOS), i microsistemi elettromeccanici (MEMS) e i laser scanner sono alcune delle tecnologie innovative discostanti dalla sensoristica tradizionale.

La notevole varietà di soluzioni porta l'adozione di sistemi di monitoraggio che permettano l'acquisizione di particolari grandezze di interesse scegliendo la tipologia del dispositivo più idonea.

In questo capitolo lo scopo è quello di catalogare i sensori attualmente in uso sui ponti definendo:

- Tipologia di sensore;
- Descrizione della tecnologia;
- Impiego in ambito strutturale;
- Tipologia di output atteso e, se è presente, la modalità di rielaborazione del dato;
- Condivisione del dato all'interno dei BMS.

Successivamente si ha una distinzione in base alle macrocategorie legate ai sensori, esse si dividono in base al tipo di dato acquisito e alla tecnologia adottata. Avremo i sensori statici, dinamici e altre tipologie di sensori. Esse non possono essere confrontate con le prime due dato che sono ancora in fase sperimentale o sono una combinazione.

### **1. SENSORI STATICI**

I sensori di tipo statico sono impiegati per registrare in modo continuo la risposta quasi-statica alle azioni d'esercizio ed i parametri ambientali. Per risposta quasi statica si intende una tipologia di misurazione adatta per valutare il dato compatibilmente con le variazioni attese. Nel caso di sensori statici hanno il compito di monitorare eventi come fessurazioni o deformazioni, questi fenomeni si evolvono lentamente nel tempo e quindi non avrebbe senso estrapolare troppi valori, essi porterebbero solo ad avere informazioni inutili e compilazioni di file troppo pesanti.

La frequenza di campionamento o *sample per second* (SPS) tipicamente è impostata seguendo due metodologie: acquisizione di dati oraria per sensori installati su elementi a bassa attenzione e acquisizione a 1Hz impostati per un campionamento continuo.

Le grandezze maggiormente misurate riguardano: deformazioni, spostamenti, rotazioni, tensioni e parametri ambientali. Non tutti danno delle informazioni legata esclusivamente alla struttura, alcuni di essi vengono impiegati per monitorare i fenomeni legati agli argini o, se siamo in presenza di corsi d'acqua, l'andamento del fiume o l'erosione dell'alveo.

Successivamente si ha la classificazione di tutti i sensori utilizzati, definendo le singole caratteristiche separatamente in modo da rendere tutto più organizzato e ben comprensibile.

### 1.1. PENDOLO

*Tipologia di sensore.* Pendolo diritto e rovescio.

*Descrizione della tecnologia.* Pendoli diritti e rovesci vengono generalmente impiegati per la misurazione di rotazioni e traslazioni di grandi strutture.

Il principio di funzionamento delle due tecnologie si basa sulla fisica del filo a piombo. Esso è costituito da un filo flessibile con ad una estremità una massa e dall'altra ancorato; per il peso della massa si dispone esattamente secondo la verticale. La misura consiste nel registrare lo spostamento di uno o più punti appartenenti alla struttura rispetto alla verticale gravitazionale dettata dal filo a piombo. Nel caso di pendoli rovesci il filo non è ancora superiormente ma inferiormente, all'estremità opposta è collegato ad uno speciale galleggiante libero di muoversi in una vasca con all'interno dell'olio che lo mantiene costantemente verticale rispetto al punto di ancoraggio.

*Impiego in ambito strutturale.* Viene impiegato specialmente su grandi strutture quali dighe in calcestruzzo, alti edifici, torri e campanili. Nell'ambito dei ponti e viadotti viene installato nelle pile, nelle spalle per la misura di rotazioni, invece nei versanti per la misura degli spostamenti negli ammassi rocciosi.

*Tipo di output atteso.* Il tipo di output atteso dipende dalla tipologia di pendolo adottata. Tipicamente la misurazione avremo nelle ascisse il tempo e nelle ordinate gli spostamenti o rotazioni.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non dipende da fattori ambientali esterni come la temperatura. Non si ha una rielaborazione del dato.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* All'interno delle piattaforme di condivisione è possibile condividere il dato definendo delle caratteristiche sia al sensore e sia all'elemento.

A livello di sensore i dati che possono essere condivisi dipendono dalla tecnologia adottata e sono:

- Rotazione o spostamento all'istante dell'acquisizione;
- Rotazione o spostamento limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise delle informazioni utili per una corretta e veloce consultazione invece di interrogare singolarmente ogni singolo sensore e si ha:

- Rotazione o spostamento *medio* all'istante dell'acquisizione;
- Rotazione o spostamento limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione.

In un solo elemento possono essere presenti più sensori installati, per una corretta condivisione è possibile considerare la media di tutti i sensori ed avere un unico dato rappresentativo. Nel momento di anomalia l'informazione presente sulla struttura ci riporta ad analizzare ogni singolo sensore per capire l'entità del danno o del malfunzionamento.

La condivisione del dato riguardante i versanti non è attualmente di nostro interesse essendo delle informazioni distaccate dal BIM ma indirizzate verso il GIS.

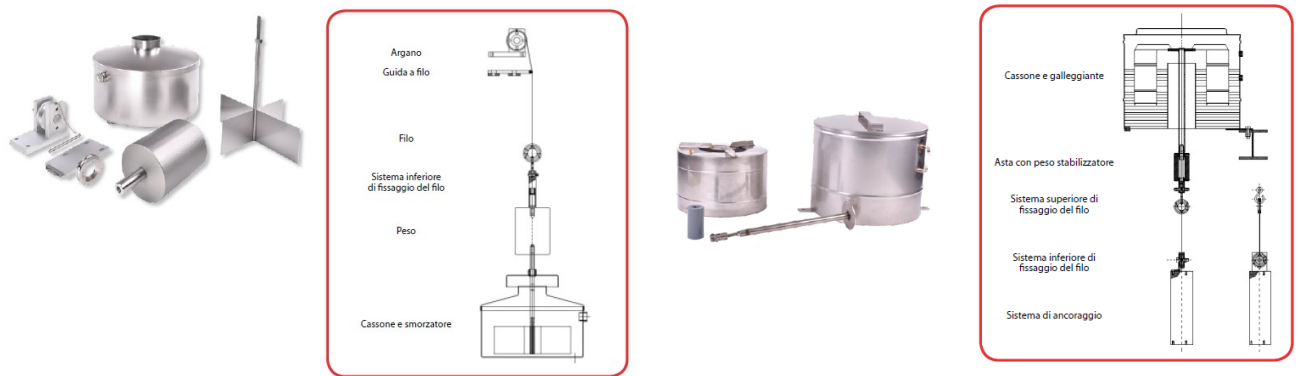


Figura 6 - Pendolo diretto e pendolo rovescio

## 1.2. INCLINOMETRO

*Tipologia di sensore.* Inclino metro fisso o removibile.

*Descrizione della tecnologia.* La tecnologia è composta da un tubo guida con all'interno un corpo cilindrico in acciaio inossidabile, contenente un sensore MEMS, completo di rotelle basculanti atte a mantenere un corretto posizionamento. Possono essere impiegati singoli sensori situati in punti strategici della struttura o più sensori incolonnati all'interno di un unico tubo guida con lo scopo di misurare le rotazioni sulla struttura. I movimenti provocati da una rotazione portano ad attivare il sensore essendo installato su di esso.

Le misure vengono effettuate due volte a diverse quote, ruotando la sonda di 90°, per annullare gli errori sistematici. Esse sono riferite ad una lettura iniziale detta zero. Le letture possono essere, sia per il removibile che per il fisso, possono essere riferite alla testa della tubazione inclinometrica oppure al fondo.

Per una corretta qualità degli output la tecnologia impiegata deve essere di alta qualità e si devono considerare, in fase di consultazione, le caratteristiche riguardanti gli errori sistematici e accidentali.

Le misurazioni riguardano la deformata del tubo inclinometrico installato e viene descritto con riferimento ad un sistema di coordinate polari (modulo e azimut) o cartesiane. Il dato può essere riferito a:

- Assoluta rispetto alla verticale: fornisce la posizione assoluta della tubazione secondo i tre assi coordinati;

- Differenziale rispetto ad una lettura precedente, gli spostamenti della tubazione inclinometrica sono riferiti alla lettura *zero* o alla lettura precedente;
- Locale, si evidenziano i contributi locali ad ogni singola quota alla curva differenziale.

*Impiego in ambito strutturale.* Esso viene impiegato per monitorare i movimenti nei terreni: individuazione zone di taglio, smottamenti e frane, o nelle strutture: diaframmi, pali, dighe, gallerie, ponti e rilevati stradali e ferroviari.

Nell'ambito dei ponti e viadotti ha le stesse applicazioni dei pendoli diritti. Viene impiegato per determinare le rotazioni di pile e spalle e verificare le rotazioni dei versanti instabili.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate le rotazioni.

*Rielaborazione del dato.* Generalmente si ha una bassa dipendenza dalle temperature e dai disturbi esterni, non necessitano di rielaborazioni aggiuntive.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* Come per i pendoli, è necessaria una condivisione a livello di sensore e di elemento. Per ogni tecnologia successiva si adotterà la stessa configurazione.

A livello di sensore i dati che possono essere condivisi sono:

- Rotazione all'istante dell'acquisizione;
- Rotazione limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Rotazione *medio* all'istante dell'acquisizione;
- Rotazione limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione.

In un solo elemento possono essere presenti più sensori installati, per una corretta condivisione è possibile considerare la media di tutti i sensori ed avere un unico dato rappresentativo. Nel momento di anomalia l'informazione presente sulla struttura ci riporta ad analizzare ogni singolo sensore per capire l'entità del danno o del malfunzionamento.

La condivisione del dato riguardante i versanti non è attualmente di nostro interesse essendo delle informazioni distaccate dal BIM ma indirizzate verso il GIS.



Figura 7 - Inclinometro fisso da foro

### 1.3. ESTENSIMENTO A CORDA VIBRANTE

*Tipologia di sensore.* Estensimetro a corda vibrante.

*Descrizione della tecnologia.* L'estensimetro a corda vibrante consente di rilevare le deformazioni negli elementi strutturali, esso può lavorare indifferentemente sia a trazione che a compressione. Può essere applicato esternamente alla struttura oppure annegato in getti di calcestruzzo data la tenuta a stagna.

L'estensimetro a corda vibrante è composto da due dischi vincolati ad una corda d'acciaio. In prossimità di essa è presente una bobina elettromagnetica con lo scopo di indurre un campo elettromagnetico in modo da eccitare la corda e misurare la frequenza di vibrazione della stessa. Essa viene rilevata mediante un'unità di acquisizione ed è possibile ricondurci al valore di deformazione attraverso una proporzionalità.

Esso può essere integrato con *termistore*<sup>18</sup> in modo da poter applicare una correzione termica e verificare la grandezza di deformazione depurata dalla temperatura.

*Impiego in ambito strutturale.* Essi vengono impiegati nei seguenti campi applicativi: dighe, ponti, viadotti, strutture in acciaio, fondazioni dirette, diaframmi, platee e pali di fondazione.

Nel caso di strutture esistenti essi vengono impiegati per la misura delle deformazioni nei punti maggiormente sollecitati come sulle selle Gerber e le mezzerie degli impalcati.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate le deformazioni.

---

<sup>18</sup> Termistore: è un resistore il cui valore di resistenza varia in maniera significativa con la temperatura.

*Rielaborazione del dato.* Il dato è dipendente dagli effetti maschera come la temperatura o il passaggio dei veicoli sull'impalcato. I valori di output risultano essere incomprensibili da una prima analisi avendo degli andamenti disomogenei nel tempo; è opportuno collezione per almeno un periodo stagionale, periodo di training, la risposta dell'opera in modo da poter depurare il dato avendo conoscenza degli effetti maschera nel tempo. A due periodi differenti ricondotti a circa un anno distanza, i valori attesi devono risultare all'incirca coincidenti per non avere dei danneggiamenti strutturali.

L'analisi eseguita per i sensori dinamici, basata sulle frequenze proprie, è analoga a quella precedentemente descritta essendo influenzata dagli effetti maschera.

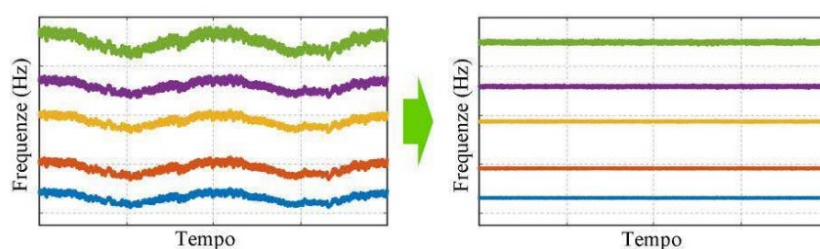


Figura 8 - Analisi di depurazione del dato statico

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* A livello di sensore i dati che possono essere condivisi sono:

- Deformazione all'istante dell'acquisizione;
- Deformazioni limite imposta dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Deformazione all'istante dell'acquisizione;
- Deformazione limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione.

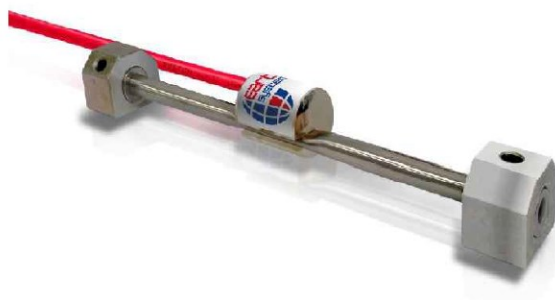


Figura 9 - Estensimetro a corda vibrante

#### 1.4. TRASDUTTORE DI SPOSTAMENTO

*Tipologia di sensore.* Trasduttore di spostamento o LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

*Descrizione della tecnologia.* I LVDT rilevano la variazione di posizione tra due punti separati relativamente brevi, misurando il movimento di un elemento lungo un unico asse avendo così uno spostamento lineare.

Esso è costituito da un cilindro metallico cavo in cui un albero di diametro inferiore, detto *nucleo*, si muove liberamente lungo l'asse del cilindro. La base del tubo è montata in una posizione fissa e l'estremità è fissata all'elemento, che tenderà a muoversi, in modo da verificare il cambiamento lungo una posizione lineare.

*Impiego in ambito strutturale.* I LVDT vengono impiegati per la misurazione dello spostamento lineare tra due posizioni ravvicinate; adattato per i movimenti tra gli elementi: trave – trave, trave – pila, trave – spalla, dispositivi di appoggio e giunti.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate gli spostamenti.

*Rielaborazione del dato.* Analoghi al sensore corda vibrante, i trasduttori di spostamento sono influenzati dagli effetti mascherati. È necessario effettuare una pulizia del dato rimuovendo l'andamento degli effetti ambientali e dai fattori non noti come il transito veicolare con la metodologia descritta precedentemente.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* A livello di sensore i dati che possono essere condivisi sono:

- Spostamento all'istante dell'acquisizione;
- Spostamento limite imposta dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Spostamento all'istante dell'acquisizione;
- Spostamento limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione.



Figura 10 - Trasduttore lineare di spostamento



## 1.5. CELLE DI CARICO

*Tipologia di sensore.* Celle di carico.

*Descrizione della tecnologia.* Le celle di carico possono essere di tipo meccanico o idrauliche, le letture sono dirette e possono essere manuali o automatiche e il sensore può essere elettrico a strain-gauge o a corda vibrante. Esse hanno lo scopo di misurare lo stato di tensione negli elementi strutturali.

Vengono generalmente installate con l'ausilio di due piastre di distribuzione dei carichi che hanno il compito di regolarizzare la superficie di contatto della cella con i punti di appoggio e contrasto. Il carico agente sulla cella deforma il corpo longitudinale attivando il sensore che rileva il dato come variazione di resistenza.

*Impiego in ambito strutturale.* A livello strutturale vengono impiegate per: monitorare le eventuali perdite di tensione negli elementi precompressi e nei tiranti, in prossimità degli elementi di appoggio e per controllare gli aumenti di pressione dovuti alla spinta del terreno sulle strutture di contenimento.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate le tensioni.

*Rielaborazione del dato.* È necessario effettuare una pulizia del dato rimuovendo l'andamento degli effetti ambientali e dai fattori non noti come il transito veicolare con la metodologia descritta precedentemente.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* A livello di sensore i dati che possono essere condivisi sono:

- Tensione all'istante dell'acquisizione;
- Tensione limite imposta dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Tensione all'istante dell'acquisizione;
- Tensione limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione.

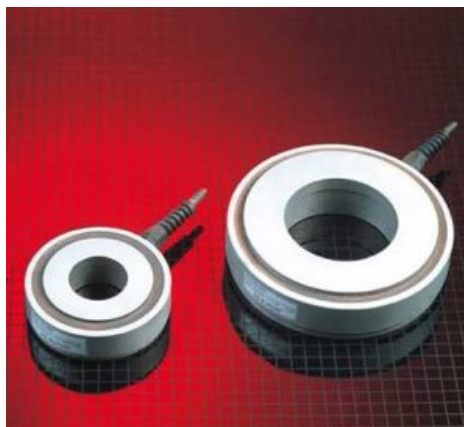


Figura 11 - Celle di carico

## 1.6. GALLEGGIANTI

*Tipologia di sensore.* Dispositivi galleggianti o Float-Out Devices.

*Descrizione della tecnologia.* Il monitoraggio consiste nell'inserire all'interno del letto del fiume il sensore, a profondità variabili, dove si ipotizza una potenziale area di lavaggio. La rimozione del sedimento tenderà a far riaffiorare lo strumento verso la superficie interrogandolo, attraverso un segnale wireless, ad un data logger per indicarne lo spostamento. Essi vengono posizionati a quote differenti in modo da poter monitorare diverse profondità in modo da poter segnalare i progressi di erosione nel tempo.

Questa tecnologia permette di monitorare il letto per un periodo di tempo limitato dato dalla presenza di una batteria interna. La manutenzione degli elementi risulta essere nulla dato che sono installati in profondità e non sono soggetti a danni da detriti.

L'installazione risulta essere agevolata per letti di fiume asciutti e nelle vicinanze di *rip-ra*<sup>19</sup>, invece quando si è in presenza di canali bagnati è necessario richiedere intervento di subacquei formati.

*Impiego in ambito strutturale.* Essi vengono impiegati per monitorare il problema di scalzamento legato alle pile e spalle.

*Tipo di output atteso.* Dato che vengono installati a più profondità, l'output riguarda il singolo sensore. Per ognuno di esso si stabilisce una quota e nel momento in cui si ha il riaffioramento, la singola tecnologia definisce l'entità del danno.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non dipende da fattori ambientali esterni come la temperatura. Non si ha una rielaborazione del dato.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* La condivisione del dato riguardante il letto del fiume non è attualmente di nostro interesse essendo delle informazioni distaccate dal BIM ma indirizzate ai sistemi GIS.

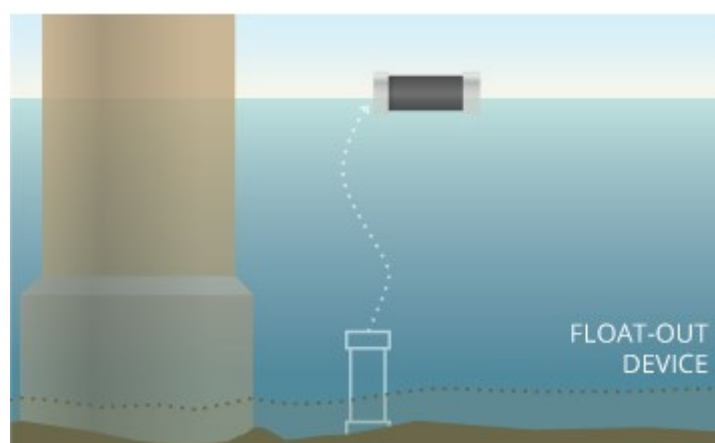


Figura 12 - Impiego con galleggiante

<sup>19</sup> Rip-rap: roccia collocata artificialmente dall'uomo per proteggere le strutture costiere, letti di fiume, spalle o pile di ponti, supporti infrastrutturali, etc.

## 1.7. COLLARE SCORREVOLE MAGNETICO

*Tipologia di sensore.* Collare scorrevole magnetico o magnetic sliding collars.

*Descrizione della tecnologia.* Come per i galleggianti, il collare scorrevole magnetico viene impiegato per monitorare il grado di erosione dei sedimenti.

Esso è composto da un'asta e da un anello guida posizionato sopra il letto del fiume, man mano che avviene l'erosione il collare tende a seguire l'andamento ed abbassarsi. Esso è composto da dei grilletti magnetici posizionati nell'asta con lo scopo di determinare, attraverso o una lettura automatica o manuale, la profondità del collare.

Essi sono di facile di installazione ma sono suscettibili sia ai detriti volatili nell'acqua ma anche dal possibile fenomeno del *biofouling*<sup>20</sup>, specialmente presente in ambienti biologicamente attivi come estuari o fiumi di mare.

*Impiego in ambito strutturale.* Essi vengono impiegati per monitorare il problema di scalzamento legato alle pile e spalle.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate le quote.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non dipende da fattori ambientali esterni come la temperatura. Non si ha una rielaborazione del dato.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* La condivisione del dato riguardante il letto del fiume non è attualmente di nostro interesse essendo delle informazioni distaccate dal BIM ma indirizzate ai sistemi GIS.

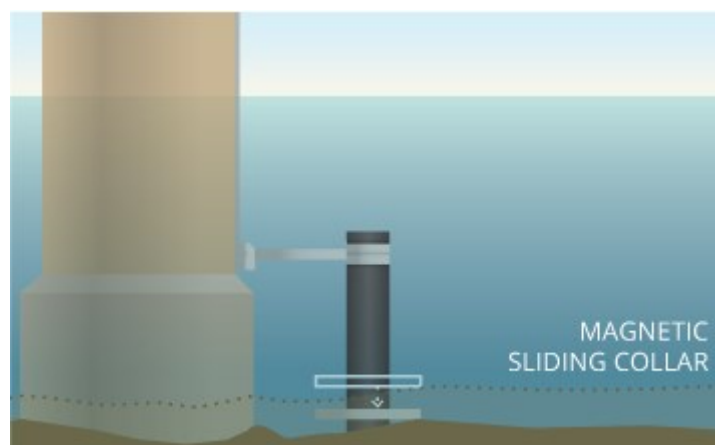


Figura 13 - Impiego con collare scorrevole magnetico

---

<sup>20</sup> Biofouling: fenomeno che si instaura con la presenza di crescita di organismi viventi creando delle "incrostazioni".

## 1.8. SONAR

*Tipologia di sensore.* Sonar.

*Descrizione della tecnologia.* I sonar sono una tecnologia di monitoraggio implementata per misurare il grado di erosione del letto del fiume misurandone la quota. Essi attraverso delle onde sonore permettono di *pingare* il fondo di un corso d'acqua e l'onda di ritorno permette di ricavare la profondità. Se il valore della quota tende ad aumentare significa che il danno legato all'erosione è in crescita.

La fase di installazione e manutenzione risulta essere non complicata per via dell'accessibilità della strumentazione, infatti, esso è tipicamente montato direttamente su un molo o una sottostruttura del ponte; inoltre, non si ha la necessità di installare tecnologie supplementari all'interno nel letto del fiume.

Nascono delle problematiche legate alla presenza di elementi sopra la superficie del pelo libero, come lastre di ghiaccio, e particolari condizioni ambientali che interferiscono sulla qualità del dato.

*Impiego in ambito strutturale.* Esso viene impiegato per monitorare lo scalzamento al di sotto di pile e spalle.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate le quote.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non dipende da fattori ambientali esterni come la temperatura. Non si ha una rielaborazione del dato.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* La condivisione del dato riguardante il letto del fiume non è attualmente di nostro interesse essendo delle informazioni distaccate dal BIM ma indirizzate ai sistemi GIS.

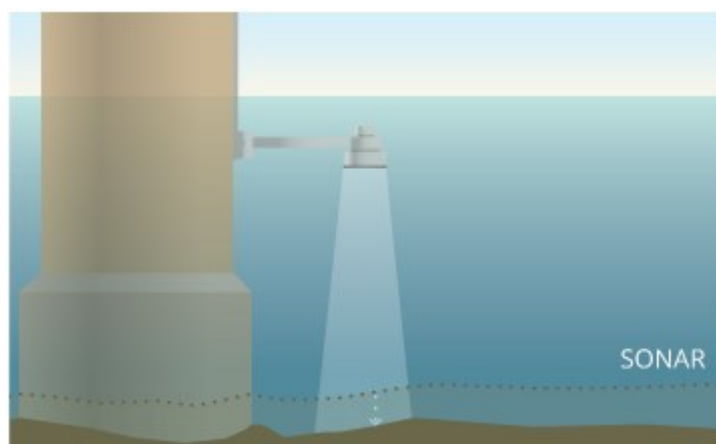


Figura 14 – Impiego con monitoraggio sonar

## 1.9. ASTA MOBILE TEMPORIZZATA

*Tipologia di sensore.* Asta mobile temporizzata.

*Descrizione della tecnologia.* L'asta mobile temporizzata permette di misurare i fenomeni di erosione che si verificano nel fondo del fiume. Esso è composto da un tubo verticale in acciaio blindato fissato alla struttura di riferimento che farà da presa; all'interno di esso è presente un'asta rigida libera di scorrere verticalmente. Superiormente è presente un motore, posizionato al di sopra del livello di massima piena, accoppiato ad un trasduttore meccanico che trasforma il movimento rotatorio dell'asse in un movimento verticale dell'asta. Il numero di giri effettuati dal motore elettrico, acquisito utilizzando un contagiri, permette di stabilire l'avanzamento verticale dell'asta.

*Impiego in ambito strutturale.* Esso viene impiegato per monitorare lo scalzamento al di sotto di pile e spalle.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate il numero di giri effettuati dal motore.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non dipende da fattori ambientali esterni come la temperatura. Non si ha una rielaborazione del dato.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* La condivisione del dato riguardante il letto del fiume non è attualmente di nostro interesse essendo delle informazioni distaccate dal BIM ma indirizzate ai sistemi GIS.

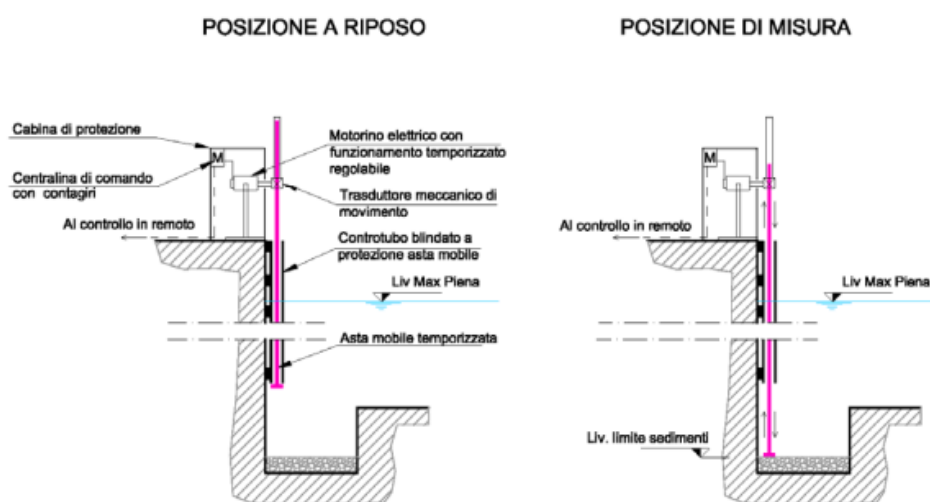


Figura 15 - Funzionamento asta mobile temporizzata

## 1.10. CORROSIONE DELLE ARMATURE

*Tipologia di sensore.* Sensore per il monitoraggio della corrosione nel calcestruzzo.

*Descrizione della tecnologia.* La tecnologia di monitoraggio si propone di misurare in modo non distruttivo alcuni parametri chimici del calcestruzzo al fine di ridurre i processi di degrado e monitorare nel tempo il processo di ammaloramento.

Esso si basa sulla misura del *potenziale* di semicella di un elettrodo, avente un diametro millimetrico, inserito all'interno del calcestruzzo in fase di getto post-getto, riferito ad un elettrodo di riferimento, a giunzione liquida, posto sulla superficie esterna dell'elemento.

Come elettrodo di riferimento si utilizza una semicella formata da una barretta di rame immersa in una soluzione satura di solfato di rame. L'elettrodo di misura dipende dal tipo di dato interessato; per i cloruri esso è composto da un filo di argento ricoperto da una pellicola di  $AgCl$  applicata mediante elettrodeposizione invece per il  $pH$  è costituito da un filo di iridio rivestito da una pellicola di ossido di iridio ottenuta mediante un processo di ossidazione ad alta temperatura.

Attraverso curve di calibrazione, specifiche per ogni sensore, le misure di potenziale vengono tradotte in valori di concentrazione. Le correlazioni di calibrazione dei sensori sono in linea con l'equazione di *Nernst*.

Il sistema di monitoraggio risulta essere non invasivo, economico ed è possibile misurare parametri chimico – fisici in punti della struttura difficilmente accessibili.

*Impiego in ambito strutturale.* Esso viene impiegato per valutare lo stato di salute delle armature precomprese e per monitorare l'evoluzione dei danni nei punti dove si ha parziale o totale distacco del copriferro.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate la differenza di potenziale.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non dipende da fattori ambientali esterni come la temperatura. Non si ha una rielaborazione del dato.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* A livello di sensore i dati che possono essere condivisi sono:

- Differenza di potenziale all'istante dell'acquisizione;
- Differenza di potenziale limite imposta dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Differenza di potenziale all'istante dell'acquisizione;
- Differenza di potenziale imposto dall'ispettore in fase di modellazione.

A differenza dei sensori precedenti non è possibile fare una media dei valori per ritrovare un valore comune essendo delle informazioni caratteristiche di un singolo punto facente parte dell'elemento.

### 1.11. SENSORE DI TEMPERATURA

*Tipologia di sensore.* Sensore di temperatura.

*Descrizione della tecnologia.* I sensori vengono impiegati per la misurazione dell'aria e del calcestruzzo, tipicamente per infrastrutture nuove.

Essi possono essere integrare all'interno dei sensori o generalmente vengono alloggiati nei pressi della cabina di acquisizione.

*Impiego in ambito strutturale.* Misurazione di temperatura esterna o del calcestruzzo.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate la temperatura.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non viene rielaborato ma viene impiegato per pulire altre grandezze di altri sensori.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* Il dato viene condiviso a livello di sensore, struttura ed elemento.



Figura 16 - Sensore di temperatura e umidità

### 1.12. SENSORE DI UMIDITÀ

*Tipologia di sensore.* Sensore di umidità.

*Descrizione della tecnologia.* I sensori vengono impiegati per la misurazione dell'umidità esterna.

*Impiego in ambito strutturale.* Misurazione dell'umidità esterna.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate l'umidità relativa.

*Rielaborazione del dato.* Il dato non viene rielaborato ma viene impiegato per pulire altre grandezze di altri sensori.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* Il dato viene condiviso a livello di sensore e struttura.

## 2. SENSORI DINAMICI

I sensori di tipo dinamico sono impiegati per registrare in modo continuo la risposta dinamica alle azioni d'esercizio. Per risposta dinamica si intendono dei fenomeni che avvengono in intervallo di tempo molto ravvicinato e discontinuo, come il transito dei veicoli, richiedendo una acquisizione molto concentrata per un periodo di tempo molto breve.

La frequenza di campionamento tipicamente è impostata tra i valori di *100/200 SPS*. Vengono implementate due diverse strategie per il reperimento del dato:

- *Misurazione periodica*, vengono registrate su un file le tracce di sensori con una cadenza di *12/24 h* per un periodo di registrazione di *5 – 10* minuti;
- *Eventi di soglia o trigger*, si definiscono delle soglie di accelerazione oltre le quali il sistema inizia autonomamente a registrare il dato e, implementando un contatore, si indicano il numero di violazione di soglia avvenute su un predeterminato periodo.

La grandezza prevalentemente misura è l'accelerazione.

### 2.1. STRAIN GAUGE

*Tipologia di sensore.* Strain gauge o trasduttore estensimetro.

*Descrizione della tecnologia.* Un sensore estensimetro misura la deformazione mediante un cambiamento di resistenza causato dall'applicazione di una forza esterna che poi viene successivamente convertito in un segnale. Esso funziona per via di una variazione di resistenza proporzionale ad una compressione o una trazione.

La tecnologia del singolo sensore è composta da un modello di lamina metallica montato su un substrato flessibile, in modo da isolare il metallo dall'oggetto prova, con successivo passaggio di corrente all'interno del pattern della lamina. Quando si ha una sollecitazione, piegandolo o attorcigliandolo, sull'asse parallelo al modello di lamina, si verifica una variazione di resistenza proporzionale alla quantità di deflessione.

Esistono diverse configurazioni, ad ognuna corrisponde una direzione caratteristica di misurazione e una applicazione strutturale differente. Le più impiegate sono la *rosetta biassiale*, i cui

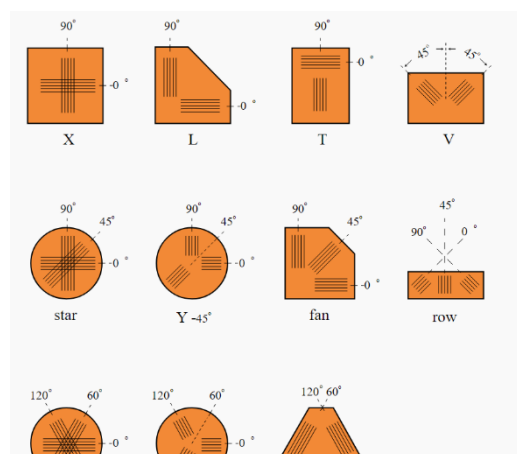


Figura 17 - Configurazione rosette estensimetriche



sensori sono montati perpendicolari tra di loro e la *rosetta triassiale* in cui sono posizionati in uno schema specifico.

*Impiego in ambito strutturale.* La funzione degli strain gauge in ambito civile è quella di misurare continuamente le deformazioni in regime dinamico data la possibilità di lavorare ad alte frequenze di campionamento. Vengono installati prevalentemente lungo le isostatiche di trazione delle travi più sollecitate e in prossimità dei giunti. Questo permette di analizzare le sollecitazioni dinamiche indotte dal traffico veicolare. Essi tipicamente vengono posti a raddoppio degli estensimetri a corda vibrante.

*Tipo di output atteso.* Nelle ascisse si ha il tempo e nelle ordinate le deformazioni.

*Rielaborazione del dato.* Analoghi ai sensori statici, i trasduttori estensimetri sono influenzati dagli effetti mascherati. È necessario effettuare una pulizia del dato rimuovendo l'andamento degli effetti ambientali e dai fattori non noti come il transito veicolare con la metodologia descritta precedentemente.

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* A livello di sensore i dati che possono essere condivisi sono:

- Deformazione all'istante dell'acquisizione;
- Deformazioni limite imposta dall'ispettore in fase di modellazione;
- Documento .pdf o html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Deformazione all'istante dell'acquisizione;
- Deformazione limite imposto dall'ispettore in fase di modellazione.

## 2.2. ACCELEROMETRI

*Tipologia di sensore.* Accelerometri capacitivi MEMS, a forza bilanciata, piezoelettrici

*Descrizione della tecnologia.* Gli accelerometri trovano impiego nelle misurazioni dell'accelerazione dinamica a seguito di urti, movimenti, impatti e vibrazioni.

Questo dispositivo permette di ricavare la forza di accelerazione impressa ad un elemento e può essere impiegato sia verticalmente che orizzontalmente, determinando tre differenti direzioni di acquisizione. Il valore ricavato può assumere dei valori sia positivi che negativi a seconda dell'orientamento del sensore, nel caso di accelerazione nulla esso misurerà soltanto il valore della forza di gravità.

Gli accelerometri capacitivi MEMS sono costituiti da una massa sismica realizzata in materiale conduttivo posta tra due condensatori a piastre parallele che agiscono in modo differenziale. Essi hanno lo scopo di misurare lo spostamento della massa sfruttando la variazione di capacità di un condensatore tenuto a distanza tra le piastre. Per evitare il contatto essa viene mantenuta in sospensione da un elemento elastico. Quando essa è soggetta ad un'accelerazione la capacità misurata agli estremi varia ed è possibile risalire allo spostamento della massa. Questa tecnologia è adatta per misurare le accelerazioni statiche però possono essere soggetti ad interferenze

elettromagnetiche con necessaria schermatura e una bassa precisione di misura. Gli accelerometri capacitivi sono quelli più economici, più comuni e più piccoli tra le tre categorie.

Gli accelerometri piezoresistivi sono provvisti di un materiale piezoresistivo che sotto l'applicazione di una forza esterna viene deformato causando una variazione di resistenza, successivamente trasformata in un segnale elettrico acquisito da un ricevitore interno al sensore. Essi presentano un'ampia banda di misura e sono in grado di registrare vibrazioni con elevata ampiezza e frequenza ma hanno dei problemi nel rilevare dei segnali deboli e sono nettamente più costosi rispetto ai capacitivi MEMS.

Gli accelerometri piezoelettrici hanno lo stesso principio di funzionamento dei piezoresistivi, in questo caso l'elemento rilevatore è il *piombo-zincato di titanio* (PZT) che, dopo una deformazione causata da un carico esterno, genera una carica elettrica. Essi sono caratterizzati da un'elevata sensibilità ed accuratezza, per questo sono i più comunemente utilizzati per la misurazione dei livelli di vibrazioni.

*Impiego in ambito strutturale.* Esso viene impiegato come identificatore dinamico dell'elemento e come contatore per poter analizzare le ampiezze di particolari eventi impulsivi. Esso può essere installato:

- *Mezzeria delle travi:* permettendo di misurare continuamente le vibrazioni dell'impalcato e, mediante identificazione dinamica, ricavare i modi di vibrare flessionali della struttura;
- *Corrispondenza dei giunti:* hanno il compito di misurare continuamente le vibrazioni dell'impalcato date da mezzi in transito. Essi registrano, su una base di soglia, gli impulsi generati effettuando una verifica sul contenuto spettrale ed osservando la stabilità nel tempo dei valori di ampiezza a parità di mezzo transitante;
- *Pulvini:* hanno lo scopo di ottenere le identificazioni dinamiche sulle pile. Esse permettono di constatare eventuali danneggiamenti o possibili spostamenti delle stesse che possono portare ad una perdita di appoggio.

*Tipo di output atteso.* Nella prima fase di acquisizione, il dato viene gestito definendo nelle ordinate il tempo e nelle ascisse l'accelerazione.

Successivamente è necessario svolgere delle fasi di pulizia e rielaborazione del dato ritrovandosi in tre situazioni totalmente differenti. A seconda della scelta adottata a monte, si ha:

- Ascisse il tempo e nelle ordinate la frequenza naturale;
- Ascisse il tempo e nelle ordinate MAC<sup>21</sup>.

*Rielaborazione del dato.* Gli accelerometri sono influenzati dagli effetti maschera. A differenza dei sensori statici è possibile rielaborare il dato seguendo due strategie differenti.

La prima rielaborazione del dato avviene svolgendo una *identificazione dinamica della struttura*. Essa consiste nel determinare le caratteristiche dinamiche di una struttura come le

---

<sup>21</sup> MAC: Modal Assurance Criterion

frequenze naturali e i corrispondenti modi di vibrare o i coefficienti di smorzamento. Esistono due differenti approcci che permettono di ricavare le seguenti caratteristiche: *approccio analitico* e *approccio sperimentale*. Il primo approccio consiste nella risoluzione di un problema agli autovalori determinando i parametri modali strutturali ipotizzando di conoscere a priori alcune caratteristiche della struttura come geometria, tipologia di materiali, distribuzione di masse e rigidzze. Al contrario, nel secondo approccio, si determinano le caratteristiche della struttura a partire da un input dinamico noto (*EMA*<sup>22</sup>); nel caso non sia noto la tecnica prende il nome di *OMA*<sup>23</sup>.

Successivamente, dopo aver compreso le analisi e le due tipologie di sollecitazioni dinamiche, si ricerca un metodo per effettuare l'identificazione dinamica, il più adatto è quello della *Frequency Domain Decomposition*. Esso si basa sulla decomposizione dei valori singolari delle densità spettrali di potenza permettendo di identificare le frequenze naturali e i vettori delle forme modali di una struttura. A seconda del risultato che si vuole ottenere, si hanno due tipologie differenti di rielaborazione del dato:

- *Identificazione delle frequenze naturali*: esse sono dipendenti dagli effetti maschera ed è opportuno, come per la rielaborazione degli output dedicata ai sensori statici, collezionare per almeno un periodo stagionale le risposte, attraverso un percorso di training, in modo da poter depurare il dato;
- *Modal Assurance Criterion (MAC)*: esso è un coefficiente, compreso tra i valori 0 e 1, ed indica il rapporto tra i modi di vibrare al momento della prima acquisizione e quelli attuali. Esso non è dipendente dagli effetti ambientali e con valori discostanti dall'unità implica una presenza di danno.

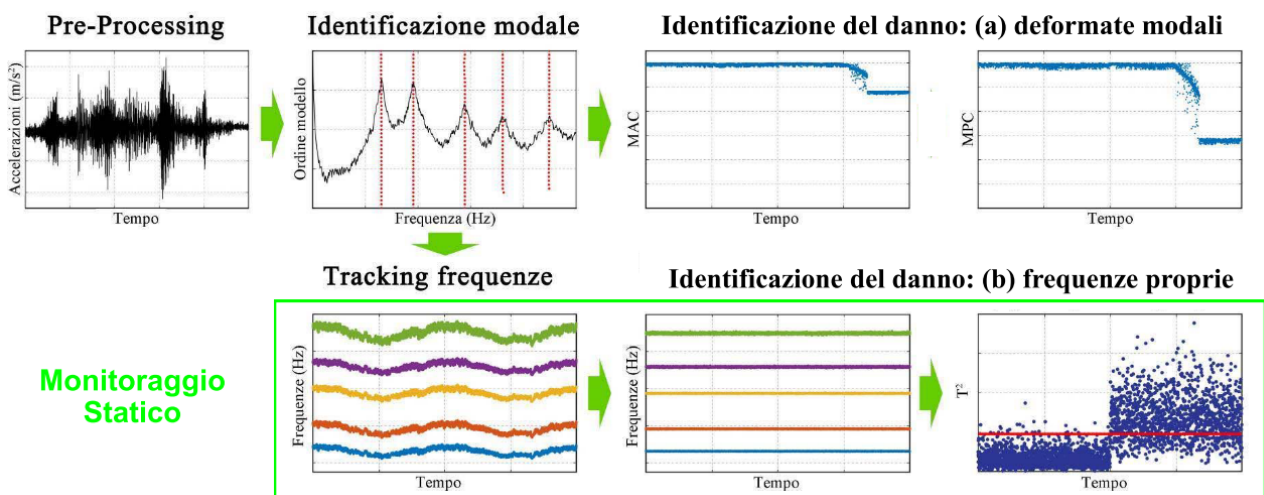


Figura 18 - Processi rielaborazione del dato accelerometrici

<sup>22</sup> EMA: Experimental Modal Analysis

<sup>23</sup> OMA: Operational Modal Analysis

*Condivisione del dato all'interno dei BMS.* I dati che possono essere condivisi nelle piattaforme di gestione dipendono dalla tipologia di rielaborazione del dato e dall'impiego del sensore nella struttura.

I sensori impiegati per il monitoraggio delle vibrazioni nei giunti, hanno lo scopo di conteggiare e valutare l'ampiezza dell'accelerazione veicolata sia a livello di elemento che di sensore. Gli accelerometri impiegati per effettuare l'identificazione dinamica si riferiscono ugualmente all'elemento sensore ma sono caratteristici del complesso struttura.

Nella *prima* tecnologia, i dati condivisi nell'entità sensore sono:

- Ultima accelerazione massima acquisita;
- Accelerazione massima imposta dall'ispettore;
- Contattore degli eventi di soglia.
- Documento .pdf o .html della storia temporale delle accelerazioni massime.

Nell'elemento possono essere condivise:

- Ultima accelerazione massima acquisita;
- Accelerazione massima imposta dall'ispettore;
- Contattore degli eventi di soglia.

Nella *seconda* tecnologia i dati condivisi nei sensori sono:

- Documento .pdf o .html della storia temporale acquisita in fase di monitoraggio.

Riferito alla struttura possono essere condivise le seguenti informazioni:

- MAC/frequenza propria all'istante dell'acquisizione;
- MAC/frequenza propria limite imposta dall'ispettore.

### **3. NUOVE TECNOLOGIE**

I sensori tradizionali possono essere sostituiti o affiancati da nuove tecnologie che possono ridurre esponenzialmente i costi e i tempi di installazione mantenendo un'adeguata risoluzione nell'acquisizione dei dati.

I ponti sono delle infrastrutture spalmate su vaste aree richiedendo, per un adeguato monitoraggio, notevoli risorse economiche e di tempo risultando di complessa implementazione. Un esempio calzante per ovviare a questo tipo problema è l'utilizzo delle tecnologie satellitari che permettono di superare questi limiti e di implementare delle informazioni che sono frequenti, accurate ed accessibili.

Le seguenti tecnologie sono ancora in fase di sviluppo e sono state implementate parzialmente per il monitoraggio dei ponti non avendo alle spalle uno studio di gran rilevanza nell'ambito infrastrutturale.

### 3.1. SENSORI A FIBRA OTTICA

Le fibre ottiche sono dei sensori classificati come guide d'onda dielettriche che permettono di convogliare e guidare al loro interno un campo magnetico di frequenza alta. Essi sono composti da filamenti di materiali vetrosi o polimerici realizzati in modo da poter condurre la luce. Ogni singola fibra è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puri denominati *core*, il nucleo cilindrico centrale, e *cladding* il mantello esterno. Esternamente alla fibra vi è una guaina protettiva detta *jacket* che serve a dare una resistenza supplementare agli stress fisici e permette di isolare la fibra dall'ambiente esterno.

Il core e il cladding hanno rispettivamente due indici di rifrazione differenti. Nel momento in cui un raggio luminoso si propaga nel mezzo trasparente ed incontra un altro elemento ma con un indice di rifrazione diverso, il fascio viene in parte riflesso e in parte rifratto. La fibra ottica funziona come una sorta di specchio tubolare: la luce che entra nel core con un certo angolo si propaga mediante una serie di riflessioni sulla superficie di separazione fra i due elementi. Se la riflessione e la rifrazione all'interno della fibra rimangono costanti, l'elemento considerato non ha subito modifiche; un cambiamento delle caratteristiche dell'elemento monitorato causa una deformazione della fibra con una successiva modifica dei parametri di riflessione e rifrazione.

Le tipologie delle reti di comunicazione tra i vari sensori si possono distinguere in:

- *Sensori singoli*: sono posizionati in punti specifici in cui si ha bisogno di ottenere delle informazioni puntuali;
- *Sensori quasi distribuiti*: sono in grado di misurare i parametri di interesse in alcuni punti specificatamente trattati di una singola fibra;
- *Sensori distribuiti*: hanno la capacità di effettuare misure con una continuità spaziale su tutta la lunghezza della struttura. La fibra percorre tutto lo sviluppo lineare dell'opera monitorata ed è percorsa costantemente da un segnale.

Le tecnologie vengono classificate (Inaudi 2000) a seconda dell'impiego e dei parametri misurati e sono:

- *Sensori a reticolo di Bragg (FBG – Fiber Bragg Grating)*: esso è uno strain gauge ottico ottenuto foto incidendo all'interno del core un reticolo di materiale caratterizzato da un indice di rifrazione differente. Ogni cambiamento di periodo dovuto alla deformazione del materiale sul quale è applicato, causa uno spostamento del picco di Bragg. Vengono impiegati per la misurazione delle *deformazioni*, *tensioni*, *spostamento* e *temperatura*. Nel caso si debba misurare contemporaneamente i fenomeni ambientali e quelli fisici è opportuno utilizzare un reticolo di riferimento libero che misuri separatamente le due grandezze. Essi possono essere impiegati per monitoraggio continui a lunga durata senza subire: fenomeni erosivi, corrosione ed effetti elettro-magnetici. L'installazione può avvenire su *lunghe distanze* legata alla bassissima attenuazione che i sensori ottici subiscono durante la loro propagazione lungo la fibra. Uno svantaggio è la loro fragilità; nell'applicazioni ingegneristiche tipicamente vengono protetti con tubi metallici in modo da non subire danni;

- *Sensori di Fabry Pèton*: essi fanno parte della classe di sensori corti o singoli. Sono costituiti da un tubo capillare di vetro che contiene al suo interno due fibre ottiche tagliate che si fronteggiano lasciando un microscopico distacco. Quando la luce viene emessa da una delle due fibre si verificano fenomeni di riflessione all'interfaccia fibra – aria modulando la luce. Quando il sensore è applicato ad un elemento che subisce una deformazione, la lunghezza della cavità si modifica e viene acquisito il valore. Su una stessa fibra è possibile posizionare solo un singolo sensore. Esso permette di ricavare la tensione su un elemento;
- *Sensori di Brillouin*: delle onde acustiche termicamente eccitate producono una modulazione periodica dell'indice di rifrazione della fibra. La luce si propaga all'interno della stessa e viene rifratta all'indietro dalla modulazione generando una componente spostata in frequenza. Questa tecnologia fa parte dei sensori distribuiti e permette di estrapolare la grandezza tensione e la temperatura distribuita;
- *Sofo (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques)*: ogni sensore è costituito da due fibre ottiche, una è dedicata alla misura e l'altra è di riferimento, protette da un tubo protettivo. Una delle due fibre viene resa solidale alla struttura e seguente l'andamento di trazione e compressione; l'altra ha la funzione di compensare gli effetti termici lasciandola svincolata. Dall'unità di lettura parte un segnale ottico che viene inviato tramite un led ad infrarossi; esso viene suddiviso all'interno del sensore nelle due fibre adiacenti ed è riflesso da due specchi collocati nelle testate di ciascuna fibra ritornando successivamente nell'unità di lettura dove viene processato il dato. Questa tipologia fa parte dei sensori distribuiti e permette di ricavare le deformazioni;
- *Microbending*: questa tecnologia sfrutta il fatto che una fibra ottica multimodale è attorcigliata ad una seconda fibra o filo metallico con una struttura simile a quella di un condensatore. Quando il sistema tende a deformarsi, si rileva un aumento della perdita di intensità del segnale per microbending causato dalle curvature introdotte tra le fibre. Valutando l'intensità della luce trasmessa è possibile registrare le grandezze interessate. Essi vengono impiegati per la misurazione della temperatura, deformazione e pressione;
- *Diffusore di Raman*: sono dei sensori distribuiti basati sulla diffusione di Raman. È possibile misurare il profilo di temperatura tutto lo sviluppo della fibra emettendo un impulso ad una estremità e misurando il rapporto tra l'intensità dell'impulso *anti-Stokes* e quello di *Stokes*. In pratica quando il segnale energetico viene fatto entrare nella fibra si originano due nuovi segnali con lunghezze d'onda minori e maggiori del segnale originale. Essi vengono impiegati per la misurazione della temperatura.

### 3.2. TINRAR

L'Interferometria Radar Terrestre TinRAR è una tecnica di telerilevamento attraverso la quale è possibile misurare contemporaneamente lo spostamento di numerosi punti su strutture, infrastrutture o elementi del territorio con elevate frequenze di campionamento del dato, consentendo di effettuare sia analisi statiche che dinamiche. Esso è possibile sfruttando la naturale riflettività delle microonde degli elementi presenti nello scenario irradato senza introdurre altri sensori o riflettori a contatto con la struttura.

Esso è composto da un radar interferometrico posizionato in sito ad apertura reale *coerente*<sup>24</sup> dotato di una o più antenne emittenti e riceventi. Le grandezze estrapolate sono ricavate sfruttando il calcolo degli spostamenti lungo la linea di vista strumento-scenario (LOS), attraverso il confronto delle informazioni di fase dell'onda elettromagnetica emessa e riflessa a differenti intervalli temporali.

Le strutture che si prestano meglio per un monitoraggio sono quelle a prevalente sviluppo monodimensionale verticale ed orizzontali in modo da non incorrere a problemi di sovrapposizione legato a più punti ad uguale distanza dal radar. Le postazioni di misura devono essere multiple e posizionate su un sito stabile non soggetto a deformazioni, in modo da avere diverse prospettive e poter ricavare più informazioni contemporaneamente legate alle caratteristiche statiche e dinamiche strutturali lungo gli assi cartesiani.

L'accuratezza dell'informazioni acquisita dipende dal rumore atmosferico e può variare da decimi di millimetri a pochi millimetri a seconda delle condizioni ambientali. I vantaggi sostanziali di questa tecnologia riguardano: possibilità di acquisizione misurazioni in tutte le condizioni ambientali e di illuminazione, l'elevata velocità di campionamento dei dati riuscendo a fornire un monitoraggio continuo e la possibilità di rilevare le grandezze fondamentali senza l'impiego di target applicati sulla struttura.

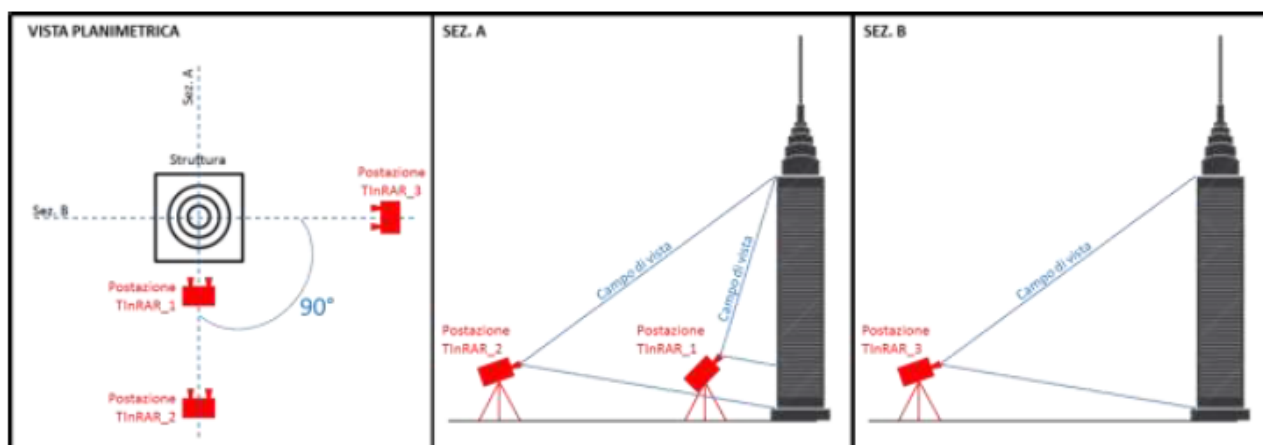


Figura 19 - Esempio posizionamento tecnologia TinRAR

<sup>24</sup> Per coerenza si intende la capacità di emettere impulsi radar a lunghezza d'onda nota.

### 3.3. A-DTINSAR

La tecnologia A-DInSAR utilizza diverse immagini satellitari SAR<sup>25</sup> in grado di monitorare nel tempo i fenomeni di deformazione della superficie terrestre con un'elevata precisione. Essa permette di ricostruire la storia degli eventi passati e di seguire l'evoluzione nel tempo grazie all'impiego di archivi di dati gestiti dalle agenzie spaziali nazionali ed internazionali.

L'interferometria SAR differenziale classica (DInSAR) consiste nella misurazione delle differenze di fase tra due immagini radar acquisite in tempi diversi, analizzando la variazione delle distanze misurate durante la prima e la seconda acquisizione dal satellite sulla stessa area in modo da ricavare uno spostamento dei target a terra. Essa però ha delle limitazioni legati all'influenza dell'atmosfera; per ovviare a questo problema è possibile impiegare numerose immagini SAR basandosi su punti di riferimento ad elevata riflettività che rimangono costanti nel tempo.

La peculiarità di questa tecnica è la possibilità di monitorare ampie zone del territorio considerando diversi target, anche molto distanti tra di loro, con un notevole risparmio di risorse economiche e di tempo ma allo stesso tempo il dato acquisito non è continuo essendo i satelliti degli elementi in movimento nell'orbita terrestre.

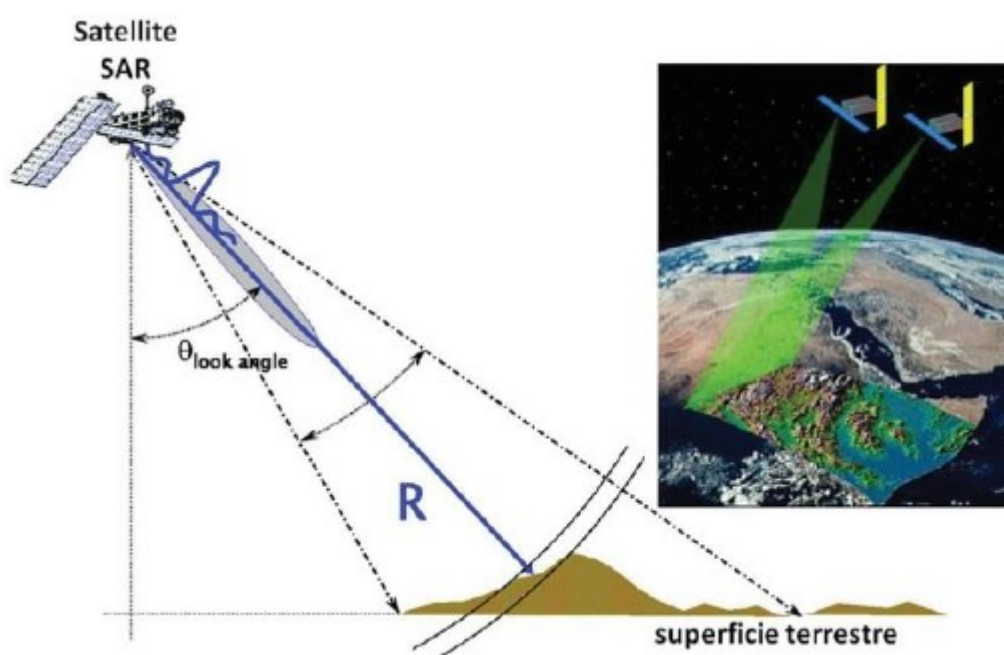


Figura 20 - Geometria di acquisizione del sistema satellitare interferometrico SAR

<sup>25</sup> SAR: Synthetic-aperture radar: è una tipologia di radar impiegato per creare immagini bidimensionali o ricostruzioni tridimensionali di oggetti come paesaggi.





# SECONDA PARTE



### 1. DESCRIZIONE DELL'OPERA

Il ponte oggetto di studio fa parte dell'Autostrada A4 Padova - Venezia, di competenza Concessioni Autostradali Venete S.p.A, avente due impalcati realizzati per permettere l'attraversamento del naviglio Brenta. Esso fu realizzato in più epoche consecutive con processi di demolizione, ricostruzione e adeguamento.

Il primo processo di costruzione avvenne tra il 1932 e il 1934, si componeva di un unico impalcato realizzato in carpenteria metallica con schema reticolare continuo. Esso era sorretto su quattro appoggi, due spalle di riva e due pile in alveo con elementi massivi in muratura e mattoni pieni poggiati ad una profondità adeguata. Le spalle, oltre alla fondazione superficiale, erano composte da palificate in legno.

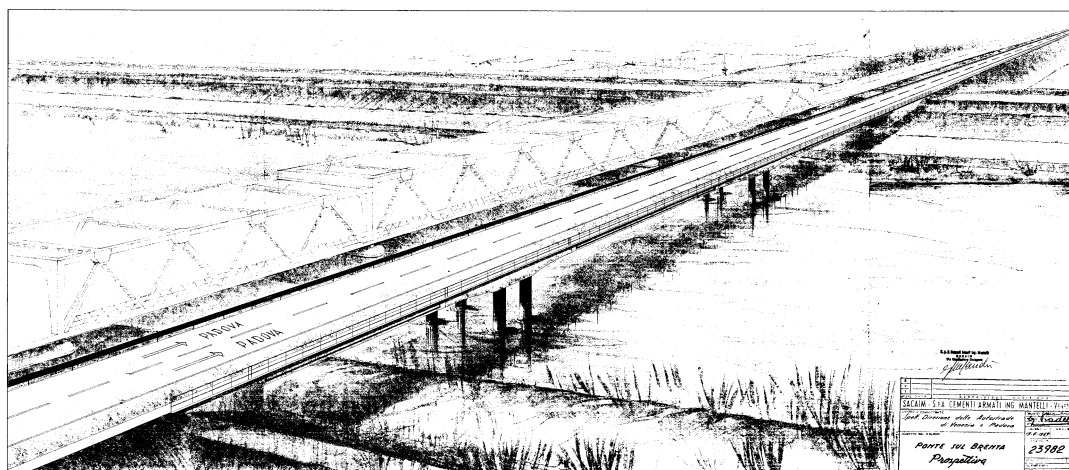


Figura 21 - Prospettiva ponte sul Brenta

Negli anni 1961 e 1962 vi fu la demolizione parziale della vecchia struttura metallica con la conservazione delle spalle e delle pile in muratura con la realizzazione di un nuovo impalcato in calcestruzzo armato lato Sud e Nord di nuove spalle e pile. Il primo prevedeva la realizzazione di elementi a cassone, per le campate laterali, che risultano continue al di sopra delle pile creando uno sbalzo per permettere l'appoggio alla campata centrale. Essa risulta costituita da travi prefabbricate in calcestruzzo armato a doppio T dotate di soletta di ripartizione e traversi per consentire gli irrigidimenti. Lo schema statico è riconducibile al sistema Gerber e tutte le strutture di impalcato sono realizzate con cavi post-tesi ad andamento parabolico. L'impalcato Nord è stato realizzato impiegando degli elementi a cassone poggiati sulle pile e collegati tra di loro da delle travi prefabbricate in calcestruzzo armato a doppio T con la stessa tecnica costruttiva adottata nell'impalcato adiacente. Le spalle e le pile sono state realizzate con calcestruzzo armato e risultano poggiati su fondazioni profonde.

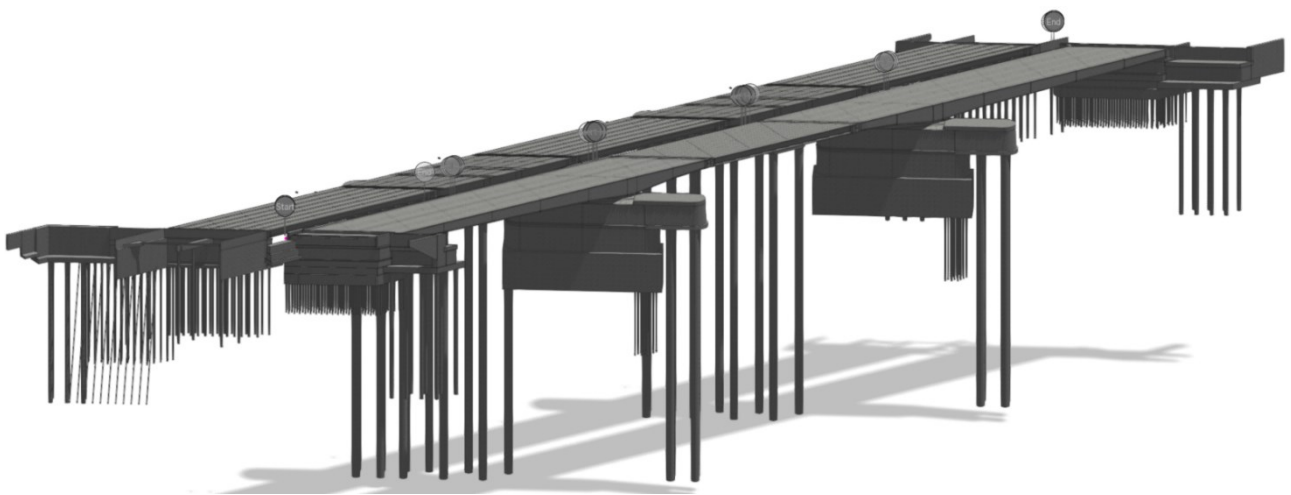


Figura 22 - Modellazione informativa del Ponte anni 1961-1962

Il primo processo legato alla manutenzione e avvenne tra il 1979 e il 1980 dove fu svolta un'ispezione straordinaria e furono riscontrate delle anomalie legate ai materiali strutturali e agli elementi non strutturali. Nell'impalcato Nord furono riscontrati dei danneggiamenti sui: dispositivi di appoggio completamente inefficienti, tra i giunti dell'impalcato parzialmente ostruiti da materiali presenti sulla pavimentazione e nelle zone adiacenti alle testate. I fenomeni di danneggiamento nell'impalcato Sud riguardano il degrado superficiale del calcestruzzo e l'ossidazione delle armature di acciaio in più posizioni specialmente all'intradosso.

Negli anni 1990 e 1991 la carreggiata venne allargata con la realizzazione di una corsia supplementare completamente in carpenteria metallica collegata con la struttura esistente. Lo schema statico della nuova struttura è in linea con quello della struttura esistente cercando di mantenere le stesse linee. Per la realizzazione del nuovo impalcato è stato necessario progettare un ampliamento delle spalle e delle pile in modo da poter sorreggere la struttura.

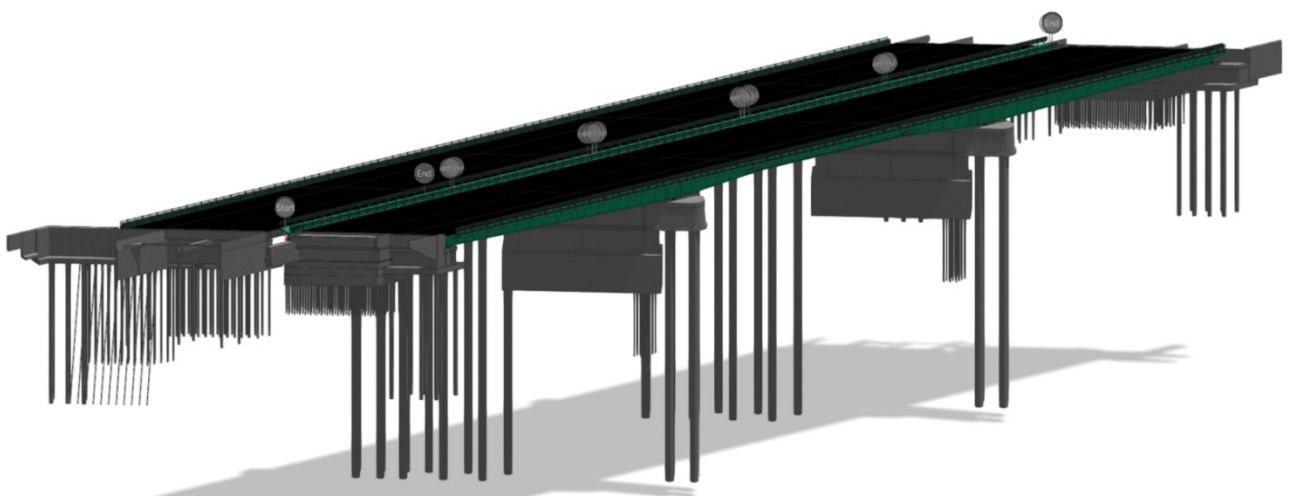


Figura 23 - Modellazione informativa dello stato attuale

## 1. DESCRIZIONE DEL SOFTWARE IMPIEGATO

Il software impiegato per il caso studio è *Midas CIM*, un prodotto sviluppato da *Midas IT* dedicato alla modellazione *infraBIM* (Infrastructure Building Information Modeling). Esso è suddiviso in quattro sezioni per la gestione interoperabile dei vari aspetti progettuali:

- *Modeler*: è dedicato alla modellazione specializzata ed è l'applicativo impiegato per lo sviluppo del caso studio;
- *Designer*: interfaccia per impostare i modelli analitici per la fase di calcolo strutturale;
- *Drafter*: sezione per la produzione di disegni bidimensionali interoperabili;
- *Constructor*: destinata alla gestione delle fasi costruttive.



Figura 24 - Moduli interoperabili Midas CIM

Il *modeler* è l'interfaccia per la modellazione tridimensionale destinata al progettista BIM. La gestione del ponte è basata sulla gestione del layout del tracciato in modalità parametrica (linear parametric technology) nelle tre dimensioni, sia sul piano longitudinale che trasversale.

La creazione di librerie consente di gestire oggetti che si relazionano con gli elementi orizzontali, come travi e impalcato stradale, e quelli che sono invece tipicamente puntali, come sottostruttura e appoggi.

Le librerie o *libraries* sono degli elementi aggregatori di elementi semplici e si possono suddividere in:

- *Point libraries*: fanno riferimento ad un singolo punto di inserimento per quegli elementi aventi caratteristiche non con una dimensione principale di estrusione;
- *Curve Libraries*: per gli elementi caratterizzati da una dimensione principale, come travi e impalcato stradale;
- *Assembly Unit*: è una combinazione delle due precedenti, al fine di creare elementi infrastrutturali dotati di una certa ripetitività, come intere campate di un ponte o piccole porzioni di esso.

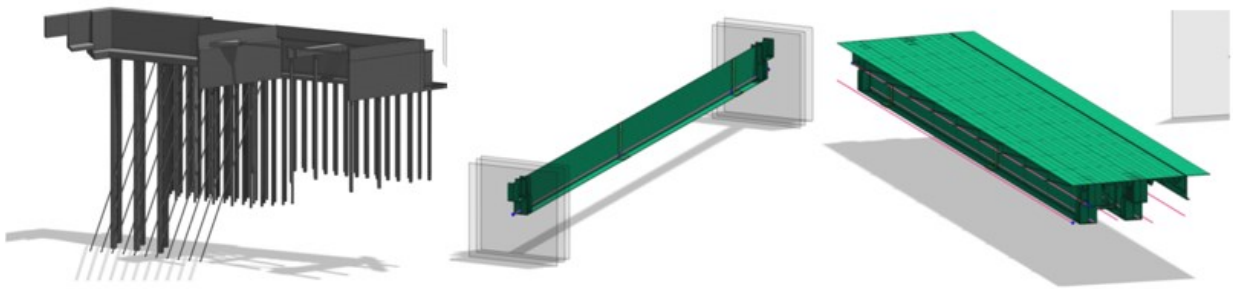


Figura 25 - Rispettivamente Point Libraries, Curve Libraries e Assembly Unit

Ognuna di esse possono essere esportate e salvate singolarmente in locale così da poterle facilmente importare in altri progetti. Questo processo sarà estremamente importante.

## 2. FASI DI MODELLAZIONE

Data la complessità dell'opera e la pesantezza del documento, è stato necessario suddividerla in due macrosistemi differenti e successivamente introdurli in un unico modello informativo da poter testare.

Prima di incominciare a modellare, si è svolto uno studio mirato ad apprendere ogni singola caratteristica strutturale analizzando in dettaglio: la documentazione dell'epoca, le indagini fotografiche e le prove svolte in situ atte a conoscere lo stato attuale dell'infrastruttura. Questo passaggio è stato importante per il successivo lavoro di modellazione, infatti, la struttura ha subito diverse modifiche nel corso degli anni e sono stati riscontrate dell'interferenze su quello che è realmente presente e quello che è stato progettato. Le problematiche maggiori sono state riscontrate nello studio delle spalle e delle pile essendo state realizzate tra il '32 e il '34 con difficoltà di ritrovare informazioni adeguate negli elaborati grafici e riconducendosi alle rappresentazioni successive.

Superata questa prima fase è stato necessario studiare il software in esame e capire come implementare i tracciati e le geometrie strutturali. La modellazione è incominciata con l'impalcato a Nord creando inizialmente la struttura in cemento armato, successivamente quella in acciaio e infine gli elementi non strutturali. Terminato questo primo processo è stato indispensabile creare un secondo modello per poter lavorare all'impalcato Sud avendo avuto dei problemi per via della pesantezza del file. Come per il primo modello sono stati modellati gli elementi del ponte partendo dalle strutture in calcestruzzo armato ed arrivando alle finiture degli elementi non strutturali. Successivamente è stato possibile esportare ogni singolo elemento localmente e ricreare un modello globale con tutte le caratteristiche informative dei due impalcati.

Per completare il modello, si è creata una gerarchia strutturale in modo da poter classificare tutti gli elementi in modo da definire due macrosistemi: sopra struttura e sottostruttura. Questo processo è stato estremamente importante nella fase di esportazione in formato *.ifc* in modo da poter riconoscere i vari elementi nei visualizzatori grafici e poterli gestire in maniera ottimale.

Come ultimo passaggio, avendo a disposizione la documentazione delle indagini in sito e un progetto di sistema di monitoraggio, sono stati implementati all'interno del modello degli elementi caratterizzanti. Per ognuno di essi è stata assegnata una forma e un colore in modo facilitare la visualizzazione in una successiva piattaforma di gestione.



## 2.1. PRIMA FASE

Nella prima fase è stato modellato l'impalcato Nord definendo inizialmente due tracciati differenti rispettivi della struttura di calcestruzzo ed acciaio, avendo essi delle lunghezze longitudinali tra di loro non concordanti. La struttura non essendo perpendicolare all'asse stradale è stato assegnato un'angolazione di 55° in modo da ricreare l'andamento del ponte. Successivamente, sono state riportate le distanze progressive che definiscono i singoli segmenti degli impalcati aventi come distanza finali pari a 165.13 m. La struttura in calcestruzzo armato è composta da due tipologie costruttive tra di loro differenti; per le campate sovrastanti le pile centrali hanno degli elementi a cassone a sbalzo con luce pari a 30.35 m, gli impalcati laterali ed intermedi sono composti da sette travi prefabbricate in calcestruzzo armato a doppio T con luce rispettiva di 36.45 m e 32.53 m. La struttura in acciaio è composta per tutto l'impalcato da due travi a doppio T: le campate intermedie risultano essere rettilinee invece quelle di appoggio seguono l'andamento della struttura in calcestruzzo armato. All'interno di esse sono presenti controventi rispettivamente: a V rovesciata per le campate rettilinee e a croce di Sant'Andrea per la struttura a profilo variabile. Le luci degli impalcati sono rispettivamente 36.45 m per le campate rettilinee e 32.53 m per le travi a sezione variabile.

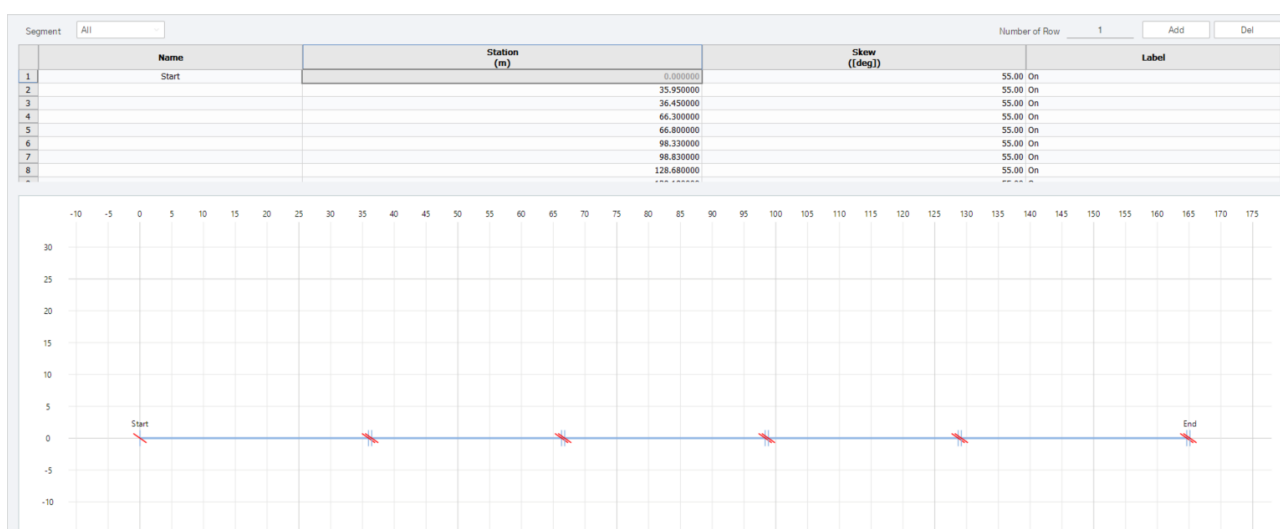


Figura 26 - Progressive impalcato Nord cemento armato

Per ogni sezione dell'impalcato è stato necessario definire un segmento dedicato alla sovrapposizione delle selle Gerber, essi sono degli elementi strutturali che si vanno a sovrapporre e se non si introduce questa accortezza si rischia di modellare elementi più corti rispetto alla realtà e non risultano combaciare in fase di visualizzazione.

Inizialmente sono state modellate le *point libraries*, in particolare le spalle e le pile, in modo tale da avere degli elementi puntuali su cui poterci riferire nel momento in cui si va ad impostare la sovrastruttura.

Per la modellazione delle pile e delle spalle è stato necessario ricercare la documentazione storica degli elementi confrontandola con la indagine fotografica in modo da comprendere la fisionomia e le possibili incongruenze.

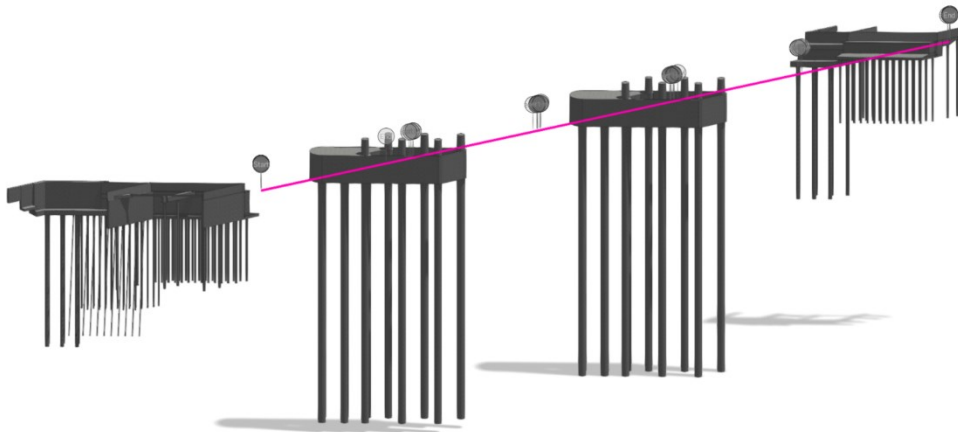


Figura 27 - Spalle e pile impalcato Nord

Essendo delle strutture con geometrie molto complesse, è stato necessario riportare su CAD gli elaborati grafici e successivamente, scomponendo l'elemento totale in più sotto parti, e ricomporlo come assemblamento di più parti.

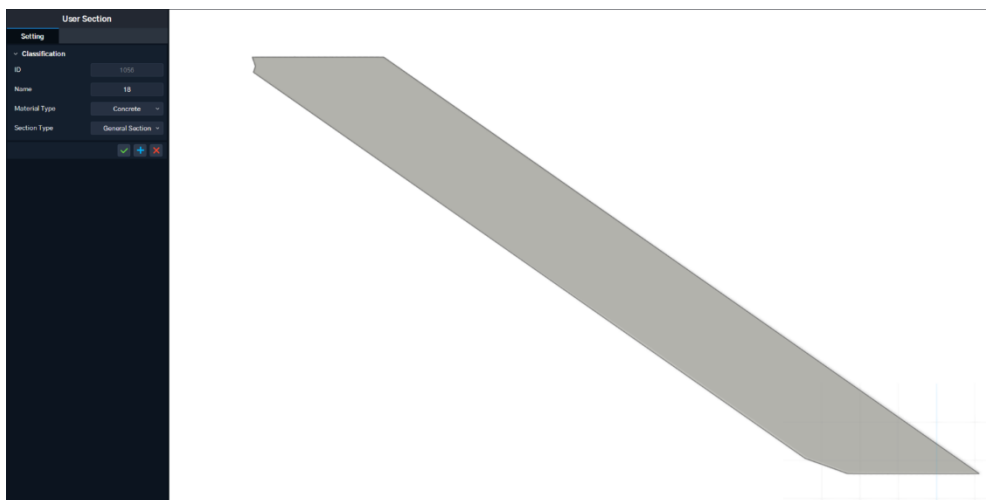


Figura 28 - Elemento strutturale base spalla lato Padova

Per ognuno di essi è stato possibile assegnare:

- *Tipologia di materiale*: il software permette di assegnare i materiali calcestruzzo ed acciaio con le rispettive nomenclature;
- *Tipologia di estrusione*: inizialmente si deve scegliere un punto definendo un piano di riferimento successivamente, modificando dei parametri che identificano una matrice, scegliere il vettore di estrusione. Per alcune tipologie di elementi risulta essere molto importante questa funzione per non incorrere in errori grossolani.

- *Anteprima del risultato*: esso è essenziale per avere un'idea indicativa senza dover ripetere la procedura un numero svariato volte.

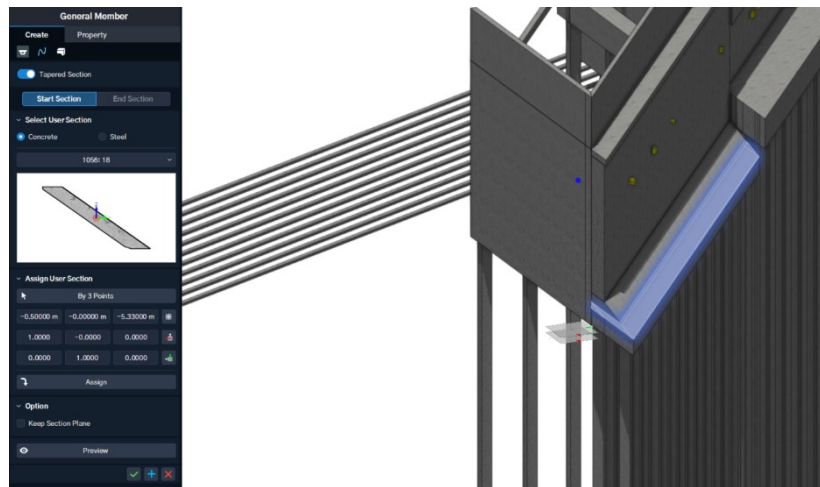


Figura 29 - Procedura assegnazione singoli elementi Point Libraries

Creata la geometria agli elementi bisogna assegnare un punto di riferimento da poter essere assegnato ad ogni entità. Creando una *Single Point* è possibile attribuire agli elementi un punto di origine, esso permette di localizzare la *Point libraries* nel complesso struttura. Se si omette questa operazione non è possibile visualizzarlo nel modello essendo un elemento fluttuante senza alcun punto di riferimento.

La coordinata nello spazio del punto di riferimento è di estrema importanza perché detterà le posizioni di tutti gli elementi strutturali che saranno modellati successivamente. Nel caso in esame la quota di origine coincide con il piano stradale e per ogni *Point Libraries* è stata scelta accuratamente in modo da non incorrere in errori grossolani in fase di dichiarazione nell' *Assembly Unit*.

Terminata la modellazione di tutte le pile e le spalle è opportuno creare delle *Assembly Unit* in modo da poterle posizionare esattamente lungo i tracciati precedentemente assegnati. In questo processo è fondamentale assegnare entrambe le *Point Libraries* all'interno di un'unica *Assembly Unit* in modo da non appesantire il progetto e riuscire a ricollegarle esattamente alle estremità del tracciato. Nel caso in esame si è omessa questa procedura avendo delle geometrie complesse, si è preferito crearne due separatamente in modo da poterle controllare senza incorrere in problemi legati alle posizioni locali.

Inizialmente si è creata una porzione di tracciato pari alla lunghezza dell'appoggio delle selle Gerber in modo da poterlo gestire al meglio in fase di inserimento. Successivamente si è definito un punto di riferimento (*Point*) in modo da assegnare la *Point Libraries* in una posizione prestabilita rispettivamente: alle estremità per le spalle ed intermedia per le pile. Definito per ogni elemento è stato possibile introdurlo all'interno del layout selezionando i segmenti di interesse.

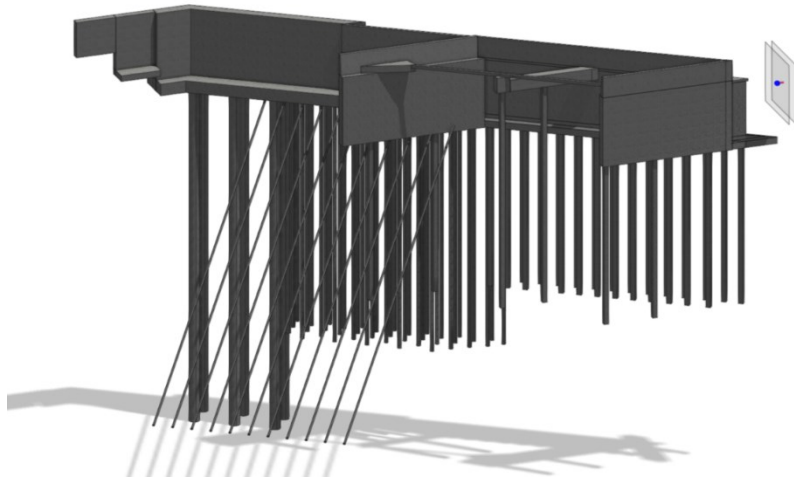


Figura 31 - Assembly Unit Pila Nord direzione Padova

Successivamente vengono riportate le *Point Libraries* delle rispettive spalle e pile dell'impalcato Nord.

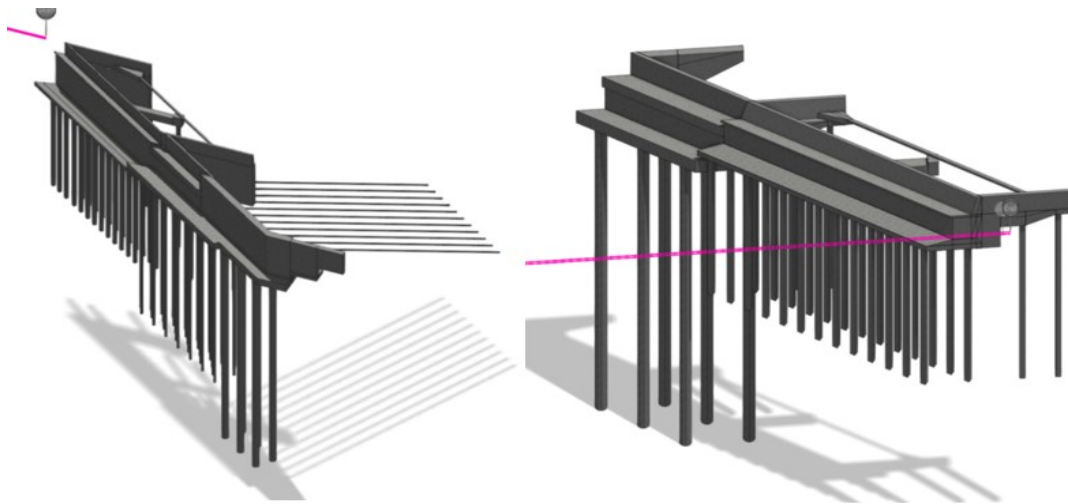


Figura 30 - Rispettivamente Spalla Padova e Venezia impalcato Nord

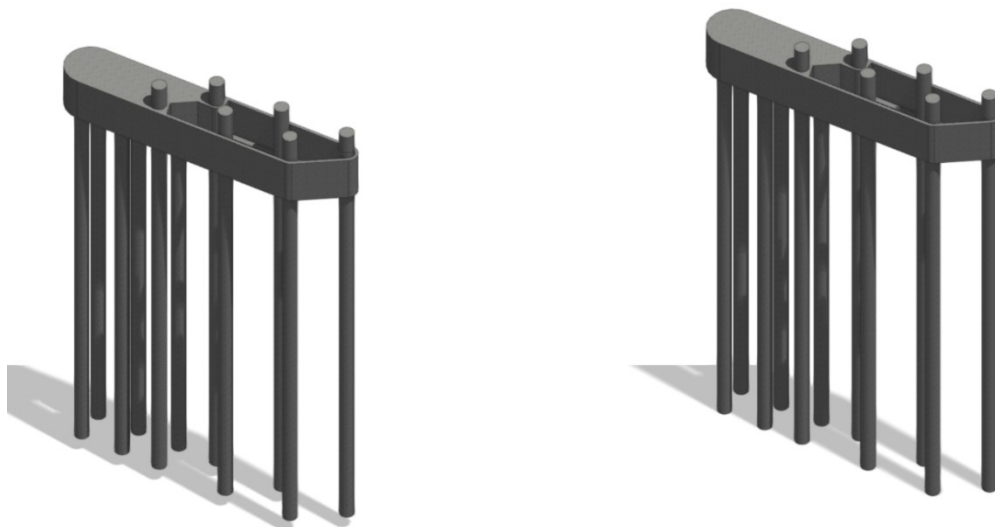


Figura 32 - Rispettivamente Pila Venezia e Padova impalcato Nord

Terminata l'assegnazione degli elementi strutturali puntuali si è passato alla modellazione degli impalcati longitudinali. Inizialmente sono state definite le strutture in calcestruzzo armato e sono state suddivise in:

- Sezione intermedia;
- Sezione campata lato Padova;
- Sezione campata lato Venezia;
- Sezione in appoggio cassonato.

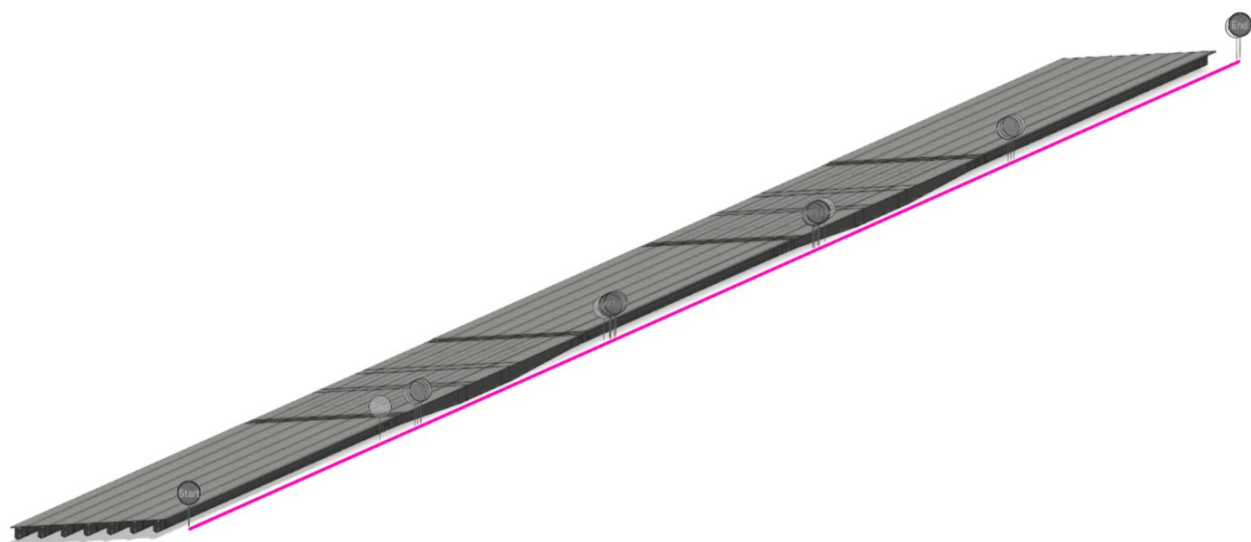


Figura 33 - Struttura impalcato calcestruzzo armato lato Nord

Le *sezioni intermedie* sono risultate quelle di più facile modellazione. Esse sono costituite da sette travi prefabbricate in calcestruzzo armato a doppio T dotate di una soletta di ripartizione con dei traversi a passo costante per consentire l'irrigidimento. Le problematiche nascono nel momento in cui si deve modellare contemporaneamente la soletta superiore e il profilo della trave, dove la prima risulta essere inclinata seguendo l'andamento del ponte; invece, le seconde sono perpendicolari all'asse stradale. Per ovviare a questo problema, non potendo impostare due rotazioni differenti su uno stesso piano di estrusione, sono state modellate separatamente e poi inserite successivamente in una *Assembly Unit* comune.

Le sezioni delle travi intermedie sono differenti rispetto a quelle di estradosso: è dovuto al fatto che, per adeguare la struttura in acciaio con l'impalcato in cemento armato, sono state eseguite delle modifiche sulle sezioni riducendole in questa fase sono state create due sezioni differenti in modo da renderle più coerenti possibili con i dati di progetto e la realtà. I passaggi per la creazione delle travi e delle solette sono tra di loro uguali avendo impiegato per entrambe l'impiego delle *Curve Libraries*, si analizzerà solo il caso delle sezioni intermedie essendo state le prime ad essere affrontate.

Prima di incominciare ad inserire le sezioni è stato necessario definire la lunghezza dell'asse di riferimento; il software permette di adeguarla a seconda della luce effettiva. Nel caso in esame si è preferito adottare quella reale in modo da controllare meglio l'importazione finale avendo delle sezioni molto variabili e diverse tra di loro.

Nella seconda fase si sono definiti dei piani di riferimento; essi hanno permesso di estrarre, per ogni sezione, la geometria dedicata mantenendo anche le variazioni di sezione.

I primi due piani di riferimento hanno la stessa distanza riportata sul layout globale, in modo da poter far sovrapporre correttamente i due appoggio delle selle Gerber.

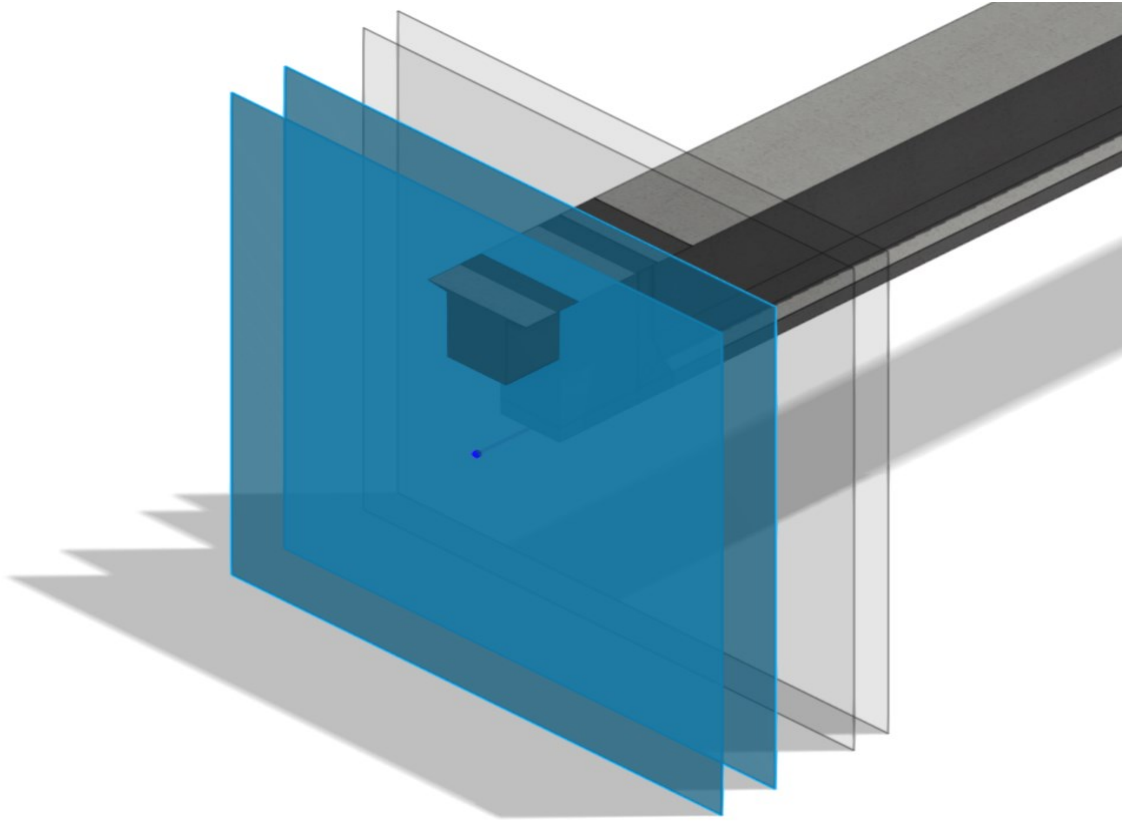


Figura 34 - Piani di riferimento per la sovrapposizione sella Gerber

Successivamente sono state create tutte le sezioni della trave per poterle poi successivamente estrarre. Sono stati creati dei file *CAD* personalizzati in modo da avere una precisione assoluta con un punto di riferimento comune.

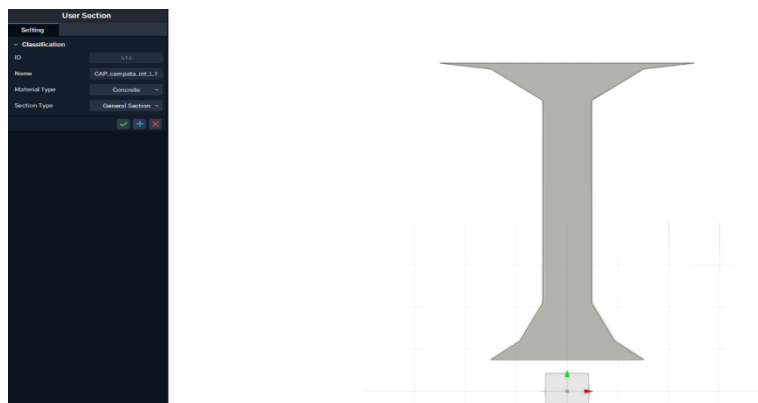


Figura 35 - Sezione anima trave calcestruzzo armato

L'importanza di questo tipo di estrusione è il poter modellare le sezioni a piacimento in modo facile ed intuitivo. Il tratto di trave dove si ha un restringimento dell'anima è stato possibile assegnare nei due piani di riferimento delle sezioni tra di loro differenti e successivamente estruderle facendo seguire il reale andamento della trave. Esso avviene impostando l'opzione *Tapered Section* e definendo la sezione iniziale in *Start Section* e quella finale in *End Section*. Come per ogni elemento costruttivo è possibile scegliere la tipologia di materiale calcestruzzo ed acciaio, ed è possibile avere un'anteprima del risultato.

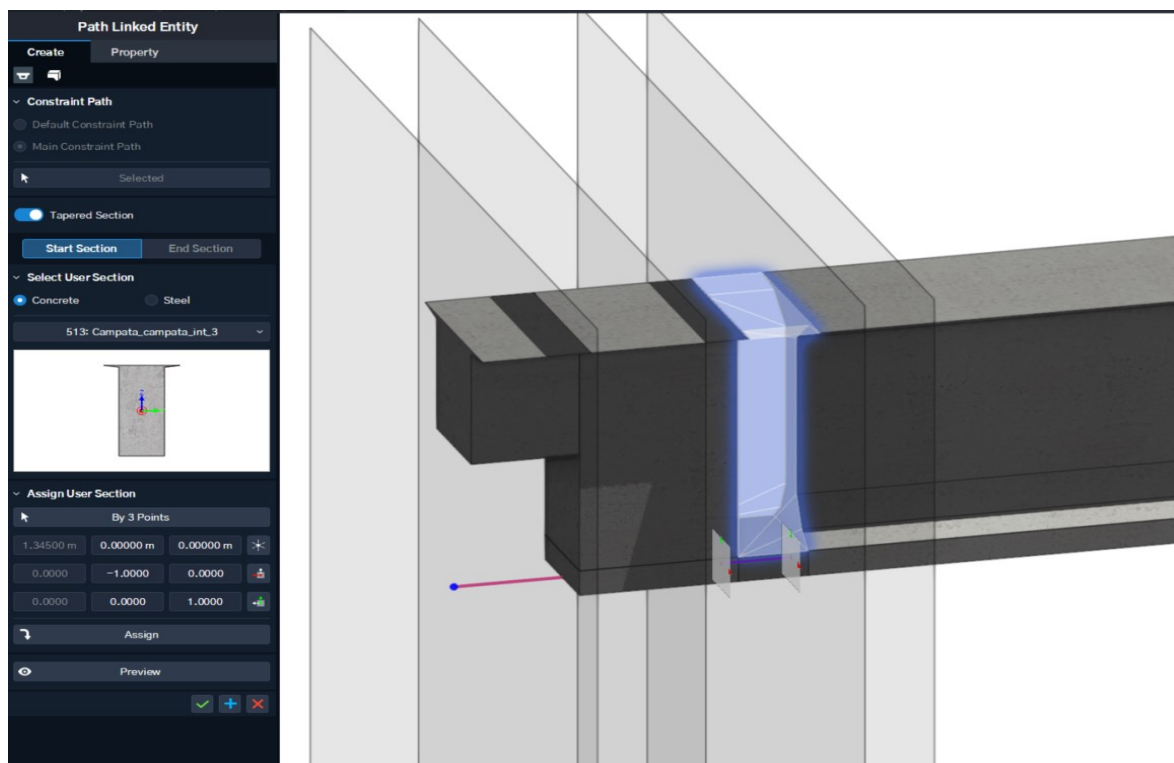


Figura 36 - Esempio cambio di sezione nell'estrusione delle sezioni nelle Curve Libraries

Successivamente vengono riportate le *Curve Libraries* rispettivamente della trave e della soletta.

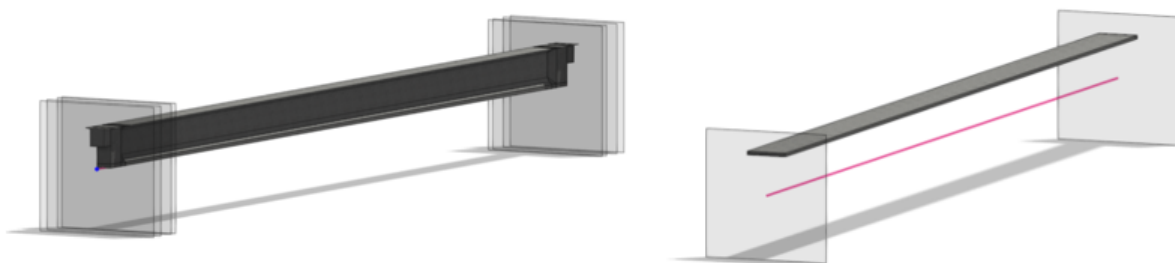


Figura 37 - Rispettivamente Curve Libraries trave e soletta

Per la modellazione dei traversi è consigliato utilizzare, come per le travi, le *Curve Libraries*, in modo da rendere il processo più veloce e meno pesante il file. Questo non è stato possibile in questo caso avendo le sezioni delle travi non sono tra loro allineate ma seguono l'andamento del ponte e

con i traversi perpendicolari all'impalcato. Sono state impiegate delle *Point Libraries* studiate in modo da poterle inserire manualmente all'interno dell'*Assembly Unit* conoscendo le coordinate negli assi delle singole travi.

Terminato il primo processo di modellazione sono stati importati gli elementi all'interno dell'*Assembly Unit* dedicata, creando inizialmente una linea di riferimento per il *Layout* globale con la lunghezza effettiva e successivamente introducendo degli assi di riferimento in modo da poterci assegnare le singole travi e solette. I traversi sono stati assegnati con lo stesso metodo adottato per le spalle e le pile, impostando dei *Point* sulle linee di riferimento a seconda della posizione spaziale. Analizzando l'*Assembly Unit* risultano essere non coerenti con la realtà ma, successivamente implementandoli nel *Layout*, si vanno a ricollocare nelle posizioni corrette.

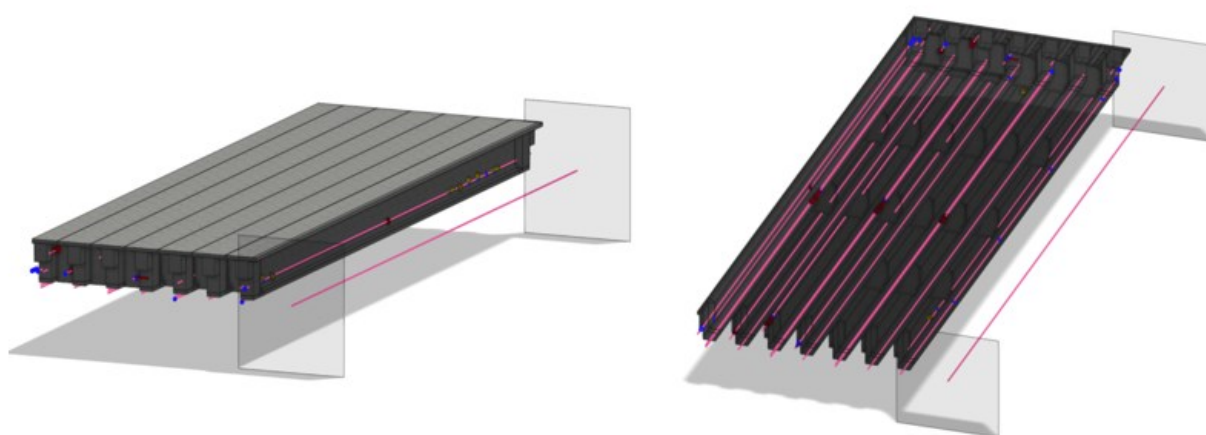


Figura 38 - Assembly unit trave intermedia impalcato Nord cemento armato

Terminata la modellazione del primo impalcato, esso è stato assegnato nel *Layout* globale.

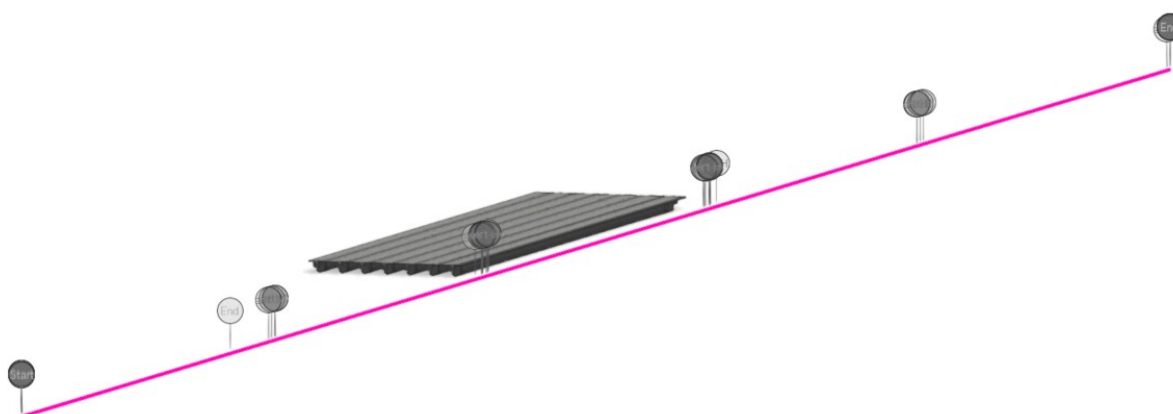


Figura 39 - Assegnazione Assembly Unit trave intermedia impalcato Nord cemento armato

La differenza di modellazione tra le sezioni in campata lato Venezia e Padova è quasi uguale, varia l'assenza della sella Gerber, infatti, alle estremità poggianti sulle spalle si hanno delle sezioni piene.



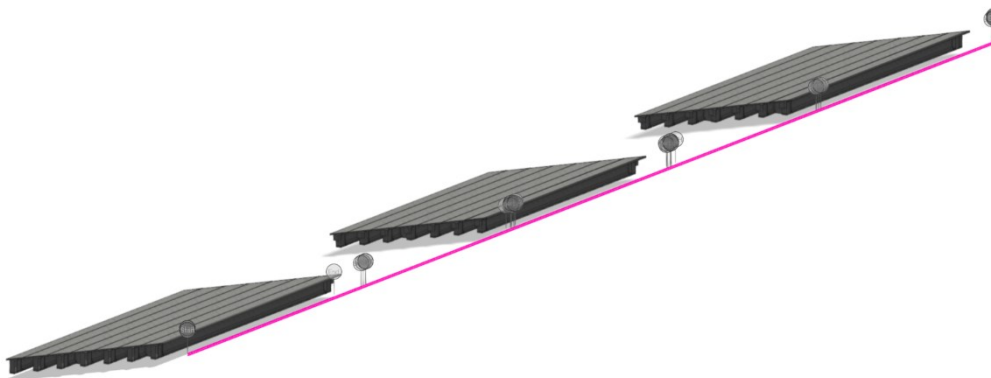


Figura 40 - Impalcato lato Venezia, Padova, intermedio calcestruzzo armato Nord

L'impalcato a cassone, poggiante sulle spalle, è stato modellato usando le *Curve Libraries* per definire l'anima e le solette, invece per i traversi sono stati implementati come *Point Libraries*. La differenza di modellazione con quella precedente è che la soletta considerata non è solo superiore ma anche inferiore essendo una struttura cassonata.

I traversi sono stati implementati come *Point Libraries* e poi successivamente introdotti nelle *Assembly Unit* impostando un andamento perpendicolare rispetto all'asse stradale

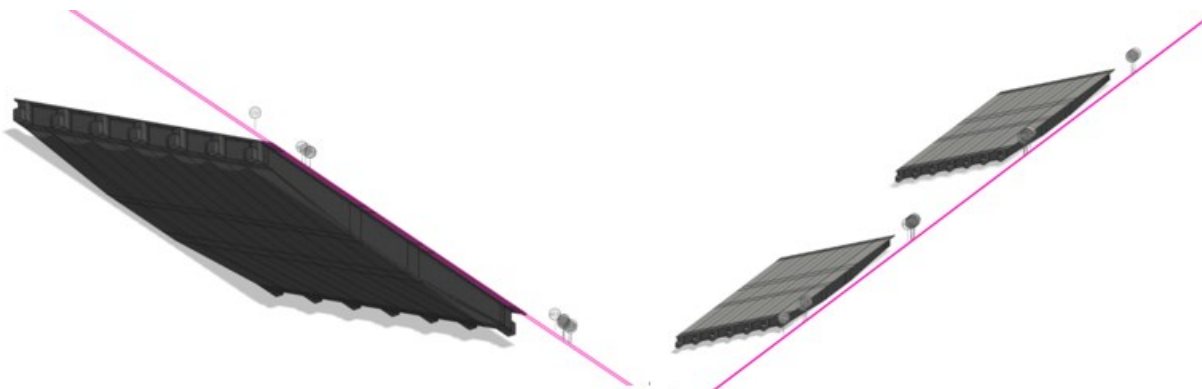


Figura 41 - Impalcato a cassone ponte Nord

Terminata la parte di modellazione dedicata al calcestruzzo è stato necessario ricercare la documentazione storica della struttura in acciaio, essendo diversa dalla precedente per via dell'ampliamento strutturale avvenuto successivamente.

La struttura in acciaio risulta avere una sezione costante lato Padova, Venezia e nella campata intermedia; invece, negli appoggi sulle pile risulta essere concordante con l'impalcato in calcestruzzo avendo delle sezioni variabili. Essa è composta da controventi a V rovescia modulari per le campate rettilinee e a croce di Sant'Andrea per la struttura a profilo variabile con schemi tra di loro diversi a seconda della posizione.

La difficoltà è nel ricreare singolarmente i traversi in modo da poterli implementare all'interno del progetto. Per la sezione costante è stato necessario modellare un singolo controvento e ripeterlo

invece per la trave a sezione variabile è stato necessario modellare otto controventi differenti per adeguarsi all' andamento delle sezioni.

Per facilità e per prendere confidenza con la struttura, sono state modellate le strutture a sezione costante in particolare quella intermedia. La parte dedicata alla trave è stata modellata impiegando una *Curve Libraries* definendo l'anima centrale e gli appoggi per la sella Gerber. Successivamente è stato necessario modellare la lamiera superiore e la piastra di collegamento tra l'impalcato in calcestruzzo - acciaio con lo stesso metodo adottato per la soletta in calcestruzzo in modo da avere una rotazione per la lamiera superiore e mantenere un profilo non ruotato per la trave.

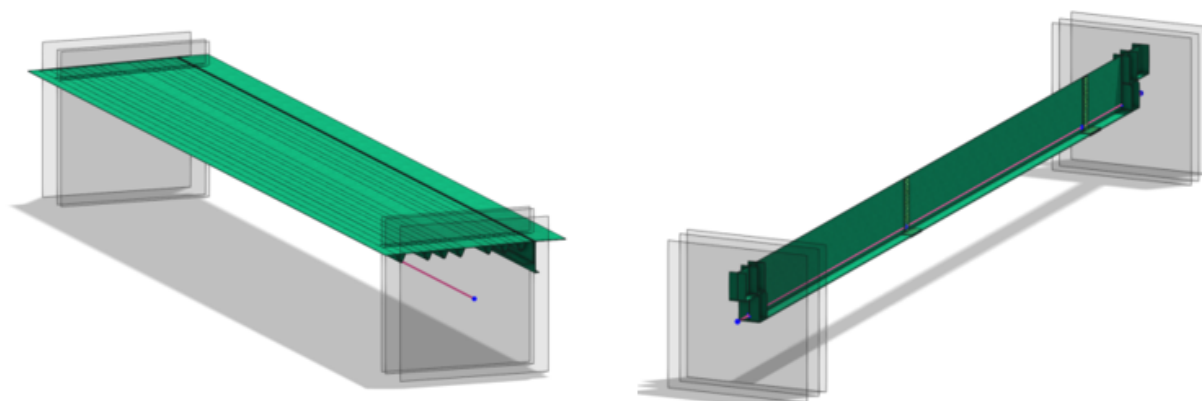


Figura 42 - Curve Libraries campata intermedia acciaio Nord

Terminato il processo di modellazione è stato necessario impostare i controventi a V rovescia. Essi sono stati modellati con le *Point Libraries*, inizialmente ricreando le sezioni e scomponendo tutte le parti in più elementi in modo da poterli ricreare; successivamente, estraendo le sezioni bidimensionali, si è composta la struttura.

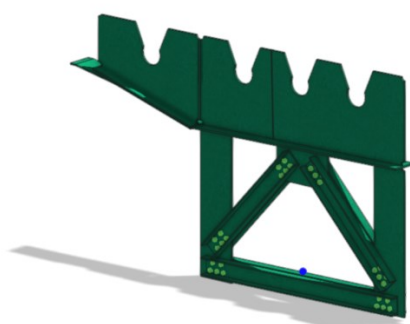


Figura 43 - Controvento a V rovescia

Il passaggio successivo è stato quello di introdurre delle connessioni tra gli elementi: piastre e bulloni. Esso può avvenire utilizzando un comando dedicato che permette inizialmente di definire la tipologia: materiale, bullone e dado; successivamente, attraverso la scelta di un piano di riferimento, definire: il numero di elementi, la posizione e la lunghezza. Esso ha permesso di

modellare diversi elementi ma non la totalità evitando in questo modo file troppo pesanti difficili da gestire in sede di modellazione.

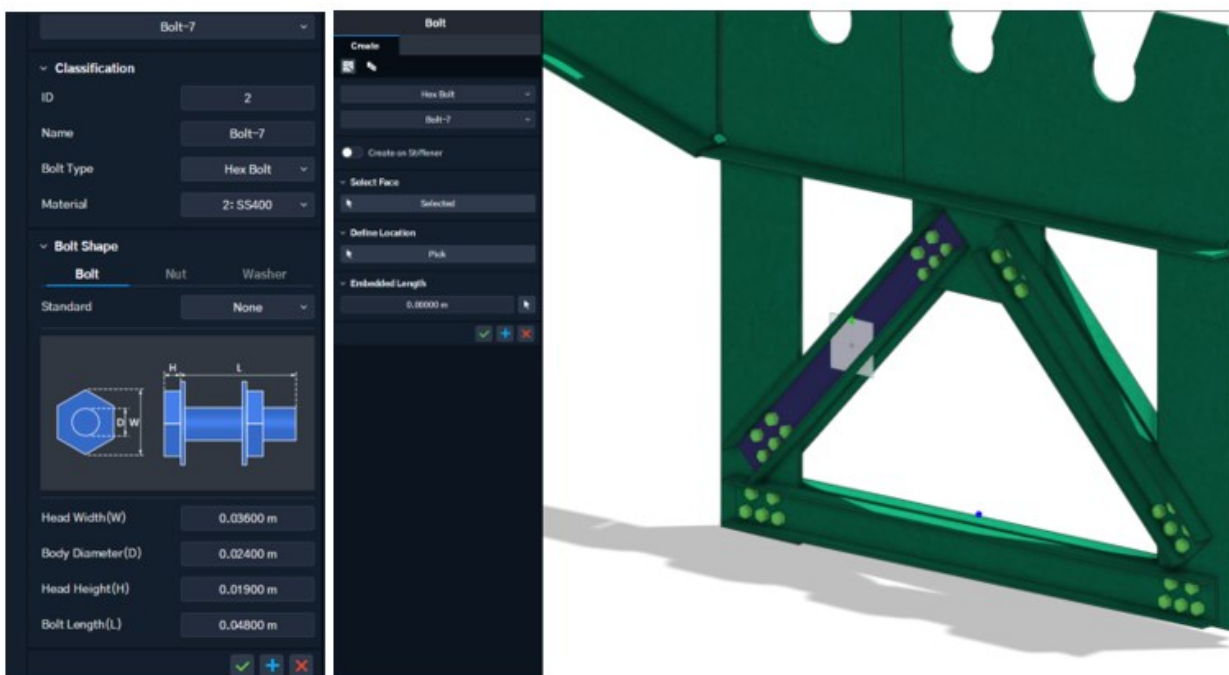


Figura 44 - Creazioni bullonature controvento a V rovescio

Terminata la fase di modellazione è stato possibile introdurli all'interno della *Assembly Unit*. Per la lamiera e i profili longitudinali portanti è stato utile creare degli assi longitudinali dove poter dichiarare le entità. Nella fase di modellazione dei traversi si è commesso un errore legato al punto di riferimento, infatti, esso è stato assegnato in mezzeria e non lungo uno dei due estremi, per questo motivo essi sono stati posizionati introducendo un asse di riferimento aggiuntivo tra le due travi.

Dopo la successiva creazione della *Assembly Unit*, esso è stato importato all'interno del *Layout*

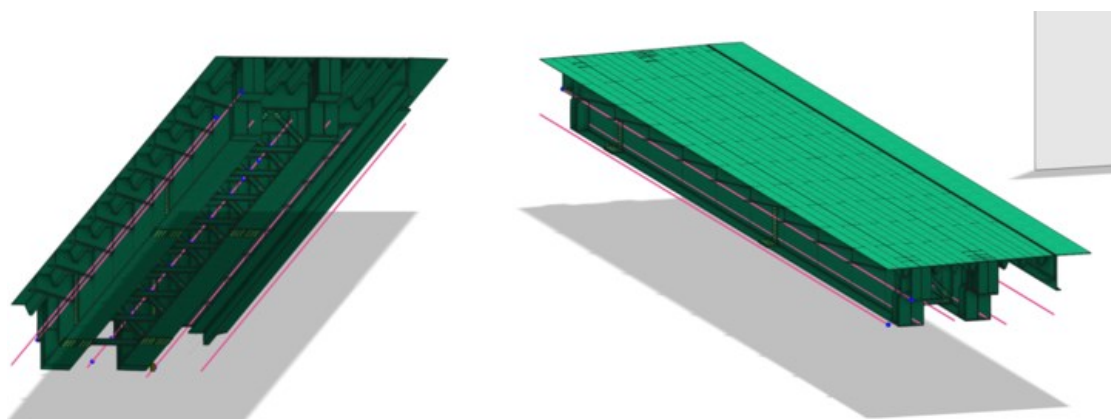


Figura 45 - Assembly Unit impalcato intermedio in acciaio ponte Nord

dove è stato assegnato al tracciato. Gli impalcati poggianti sulle spalle sono stati modellati utilizzando le *Curve Libraries* per definire gli elementi longitudinali e le *Point Libraries* per la creazione dei controventi. La differenza tra la seguente e la precedente modellazione riguarda le estremità, esse

terminano con delle sezioni che risultano essere concordanti con la sezione e non con la tipologia ricorrente nelle selle Gerber.

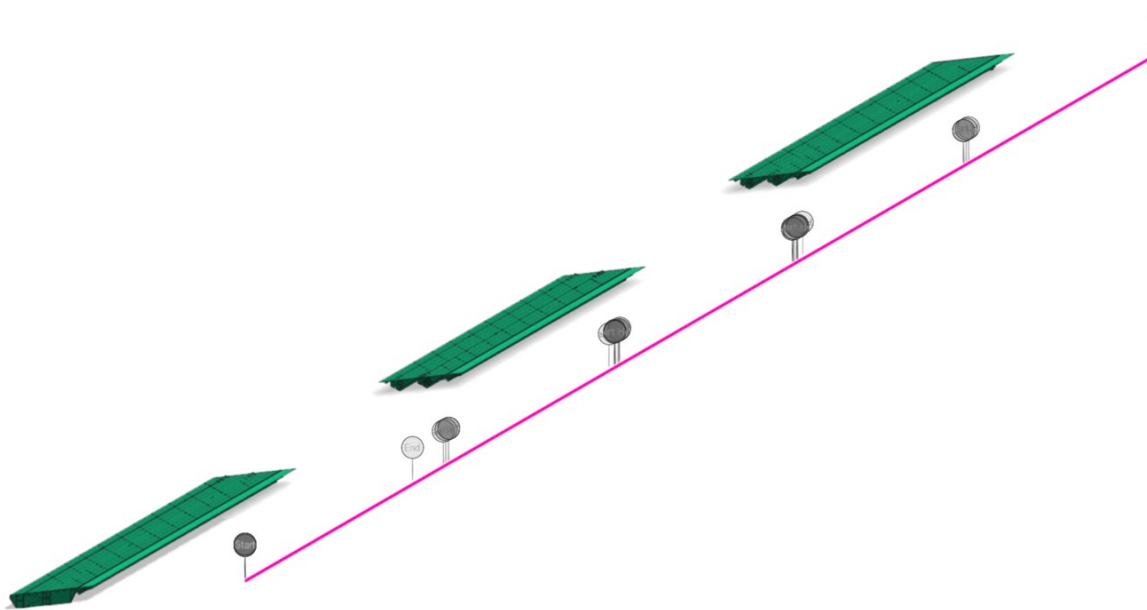


Figura 46 - Assegnazione impalcato Padova, Venezia ed intermedio struttura in Acciaio ponte Nord

L'impalcato in acciaio poggiante sulle spalle risulta essere più complicato da modellare rispetto al resto della struttura. Un primo problema è nato nella modellazione delle travi, esse risultano inclinate e leggermente ribassate le une con le altre, questo comporta una modellazione molto più precisa nell'inserimento nelle *Assembly Unit*. I controventi sono tutti diversi tra di loro quindi la modellazione è singolare con diverse *Point Libraries* e non ripetitiva, inoltre devono essere tutti precisi in quanto le due travi hanno delle pendenze diverse e la disposizione risulta essere più complicata nelle *Assembly Unit* in quanto non si hanno dei punti di riferimento sulle travi. Anche per questo tipo di modellazione le travi e la lamiera sono state modellate impiegando due *Curve Libraries* differenti, per quanto riguarda i controventi sono stati impiegati otto diverse *Point Libraries*, in questa fase non sono state modellate le bullonature. Gli unici elementi modellati sono stati gli ancoraggi impiegati per collegare la struttura in acciaio con quella di calcestruzzo, questo processo è avvenuto direttamente all'interno della *Curve Libraries* della lamiera.

L'ancoraggio con le pile avviene attraverso l'impiego di un sistema di tiranti. Essi sono stati modellati utilizzando la stessa tecnica per le bullonature in modo da ricreare il dettaglio costruttivo e mantenere le caratteristiche dei materiali. Successivamente sono stati ricreati, come degli elementi puntali attraverso le *Point Libraries*, i dispositivi di appoggio ricercando, nella documentazione storica: le geometrie e i materiali. Attraverso l'impiego della documentazione tecnica storica e le immagini fotografiche da ispezioni pregresse, è stato possibile ricreare la geometria. Non è stato possibile assegnare i corretti materiali, infatti, il software permette di creare soltanto elementi in acciaio e calcestruzzo. Quindi si è optato di modellare delle sezioni geometricamente corrette ma concettualmente scorrette, infatti, le geometrie sono composte essenzialmente di acciaio e

calcestruzzo non veritiere della realtà costruttiva. Analogamente sono stati modellati gli elementi di appoggio posizionati tra i collegamenti delle selle Gerber.

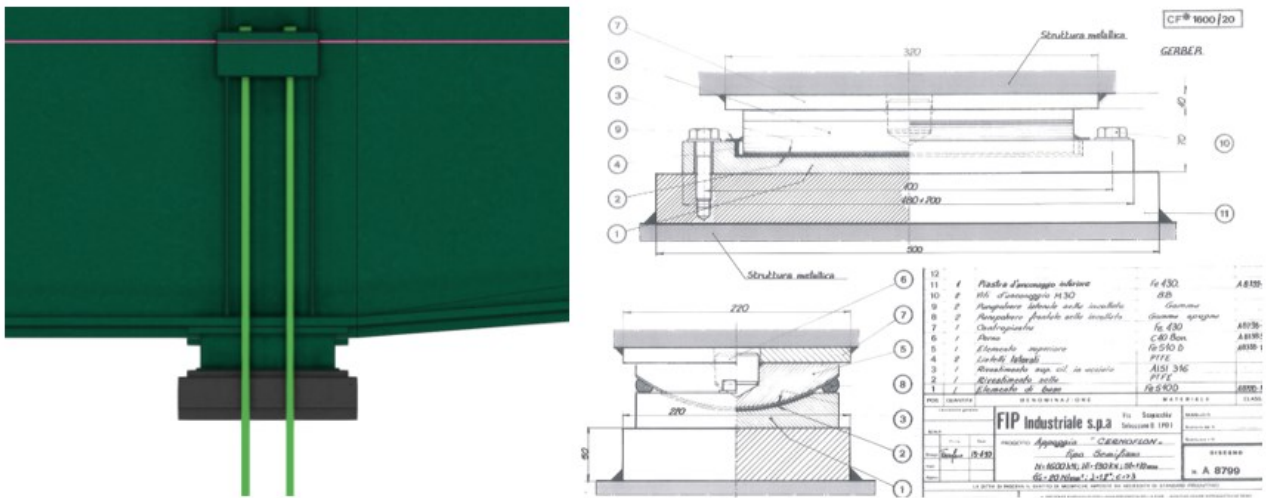


Figura 47 - Dettaglio costruttivo ancoraggio e dispositivo di appoggio ponte Nord

Terminata quest'ultima fase è stato necessario introdurre tutti questi elementi all'interno dell'Assembly Unit. Sono stati definiti degli assi di riferimento dedicati al tracciato generale degli elementi longitudinali, come travi e lamiera, e per l'assegnazione dei Point Libraries. Per quest'ultime si sono ricercati i punti per ogni asse di riferimento e sono state assegnate nelle posizioni prefissate.

Terminata la creazione dell'Assembly Unit, esso è stato importato all'interno del Layout dove

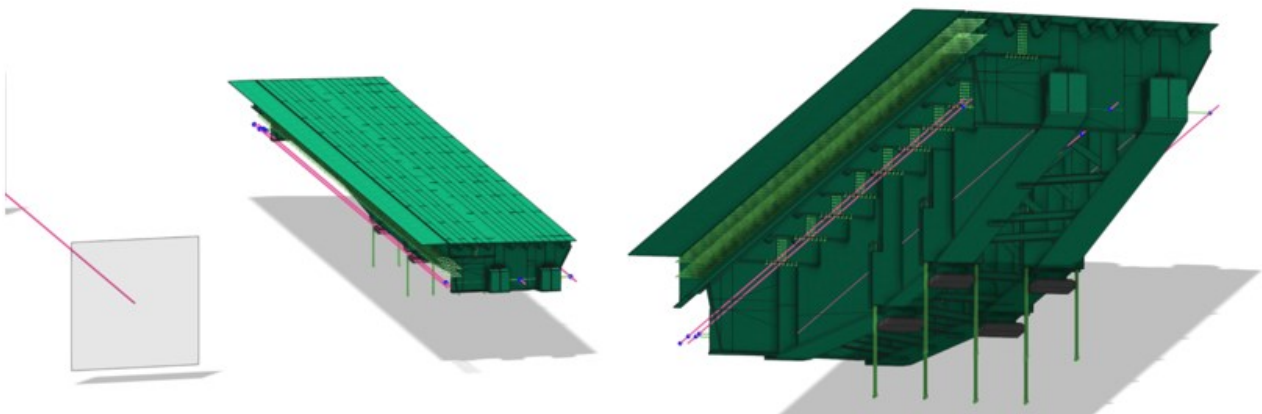


Figura 48 - Assembly Unit impalcato di appoggio acciaio ponte Nord è stato successivamente assegnato nel tracciato.

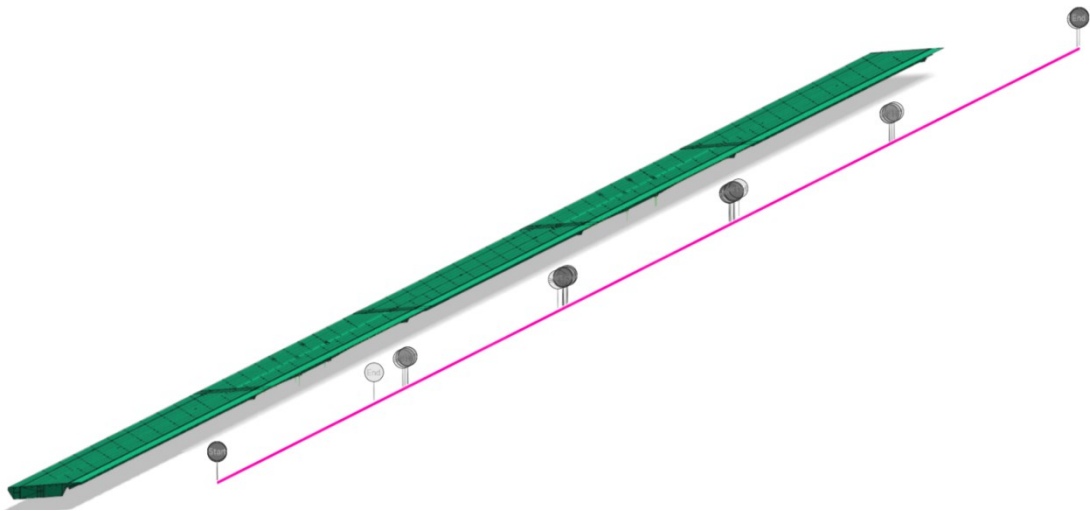


Figura 49 - Tracciato impalcato acciaio ponte Nord

Finita la modellazione della sovrastruttura e della sottostruttura è stato necessario completare il progetto del ponte Nord modellando gli elementi non strutturali.

Per questa modellazione si è deciso di ricreare il manto stradale e le barriere di sicurezza con il marciapiede non sormontabile. Il primo è risultato di facile modellazione essendo un elemento orizzontale modellabile come la soletta in calcestruzzo. Non è stato possibile assegnare un materiale diverso, oltre il calcestruzzo e l'acciaio, ma per farlo sembrare più inerente alla realtà si è deciso solamente di modificarne il colore.

Le barriere di sicurezza e il marciapiede sono risultate di difficile modellazione, infatti, è stato necessario ricreare una singola unità, utilizzando le *Curve Libraries*, in modo da poterla ripetere consecutivamente per la creazione nel modello. Esso risulta essere l'effettivo elemento presente nella realtà ed è stato ritrovato il dettaglio costruttivo nelle tavole di progetto.

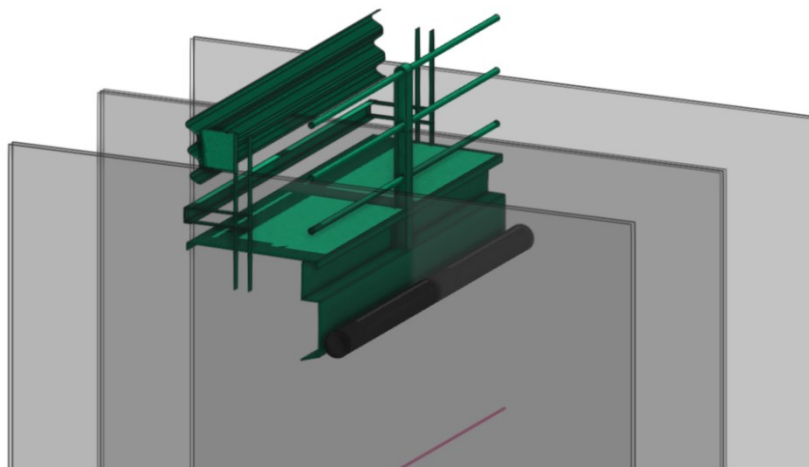


Figura 50 - Barriera di sicurezza e marciapiede ponte Nord

Successivamente è stato necessario introdurlo all'interno della *Assembly Unit* per poter effettuare questa operazione di duplicazione. La definizione di questo elemento ha portato ad

appesantire ulteriormente il file, infatti, sono state integrate una cinquantina di *Curve Libraries* all'interno di un unico elemento creando un livello di dettaglio realistico ma rendendo il lavoro molto difficile da gestire per le successive modellazioni.

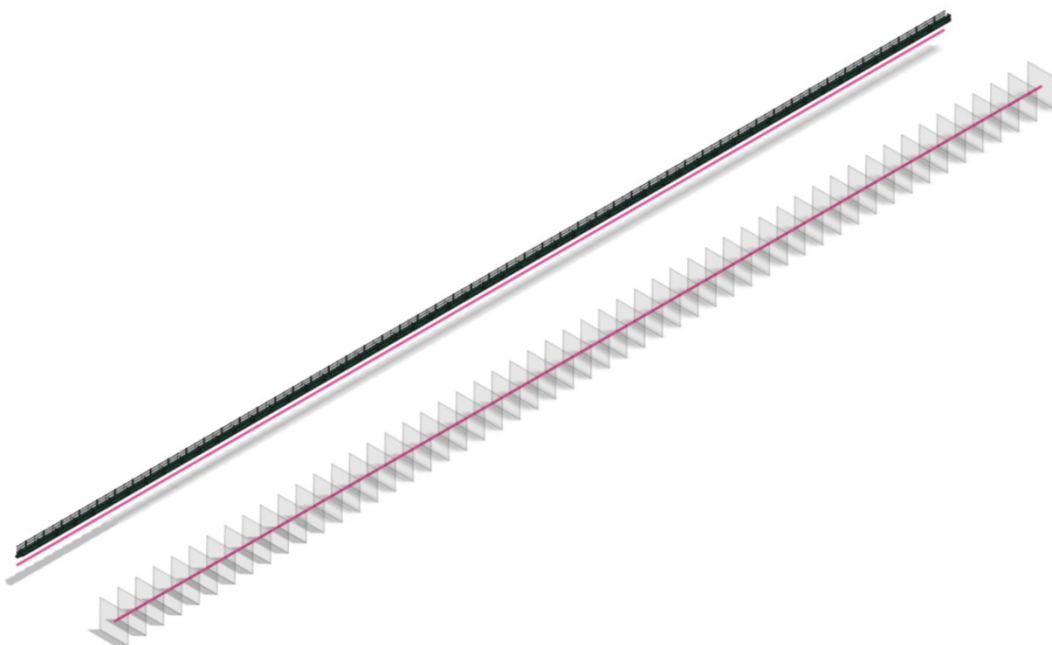

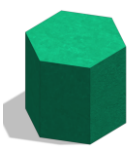
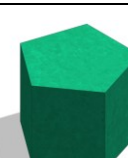


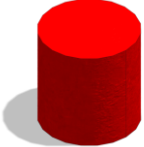
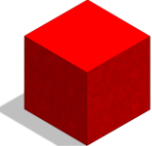
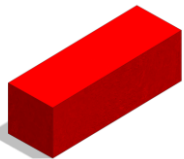


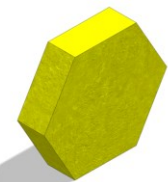
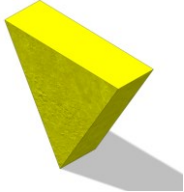
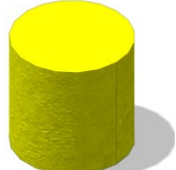
Figura 51 - Assembly Unit elementi non strutturali

Terminata la modellazione di tutti gli elementi strutturali del ponte, è stato necessario introdurre le entità legate alla sensoristica e alle indagini in situ.

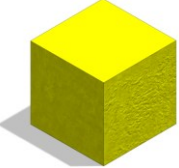
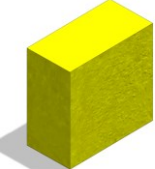
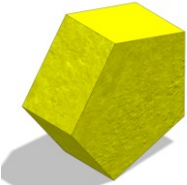
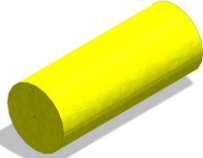

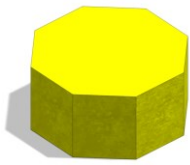
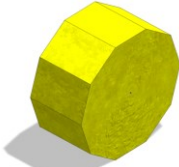
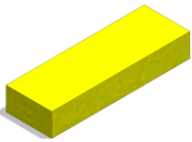
Per facilitare la visualizzazione in fase di ispezione, è stato pensato di creare degli elementi con forme e colori differenti ed assegnarli agli elementi strutturali. In particolare, i sensori sono attribuiti con un colore rosso, invece, le indagini in situ gialle.

Per facilitare la catalogazione e l'interpretazione, successivamente verranno create due tabelle dedicate ai due macrosettori dove vengono indicate le forme di ogni entità.

Monitoraggio strutturale	
	Unità di acquisizione dei dati
	Sensore di rilevamento di temperatura
	Sensore di rilevamento di umidità

	Accelerometro modale
	Accelerometro di tipo industriale
	Estensimetro a corda vibrante
	Estensimetro resistivo
	Trasduttore di spostamento
Indagini in situ	
	Esami campioni mineralogico
	Prova cloruri
	Prova pull-out



	Prova martinetto piatto singolo
	Pacometro
	Saggio/scasso
	Carotaggi diametro 80
	Carotaggi diametro 40
	Prelievo armatura
	Prove leeb
	Radar

Effettuata l'introduzione dei sensori e le indagini in sito negli elementi strutturali, è stato possibile comporre tutto il ponte per avere un modello definitivo dell'impalcato a Nord.

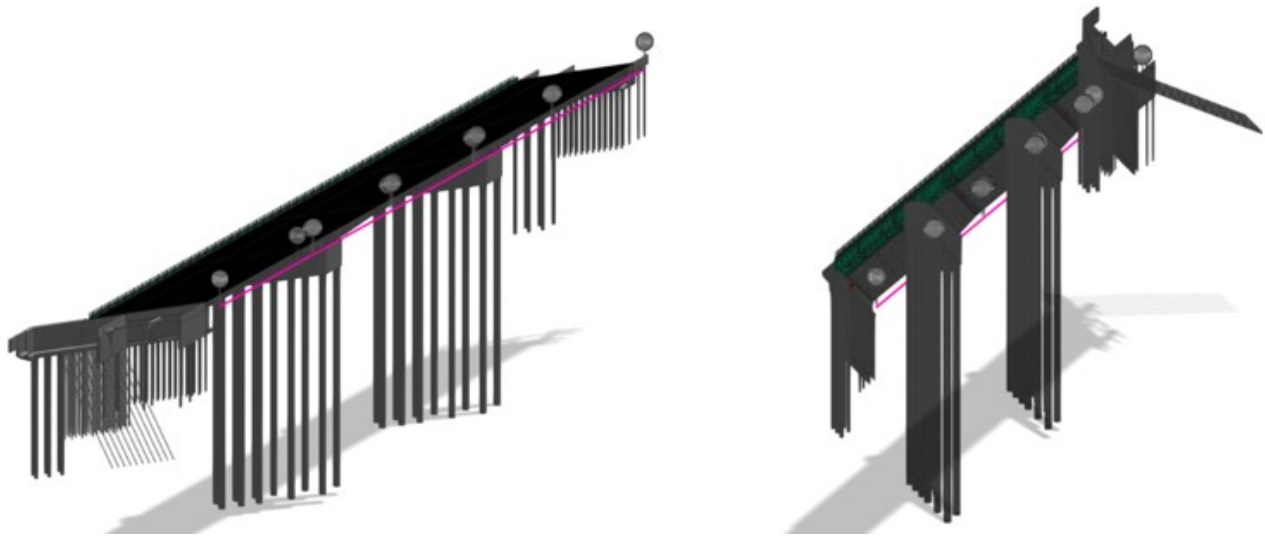


Figura 52 - Impalcato Nord

## 2.2. SECONDA FASE

Nella seconda fase è stato modellato l'impalcato Sud definendo, come per la struttura a Nord, due tracciati differenti rispettivamente alla struttura di calcestruzzo ed acciaio. Ad ognuno di essi è stato assegnato un'angolazione perpendicolare all'asse di  $55^\circ$  in modo da simulare adeguatamente l'andamento del ponte. Successivamente sono state definite le progressive che definiscono le diverse componenti dell'impalcato avendo come distanza finale uguale di  $165.13\text{ m}$ , come per l'impalcato adiacente. La struttura in calcestruzzo è composta da due tipologie strutturali differenti avendo degli elementi a cassone poggianti sulle pile e le spalle collegati tra di loro con un impalcato composto da sette travi prefabbricate in calcestruzzo armato a doppio T. Per entrambe le strutture si adotta uno schema statico ricondotto a selle Gerber. La prima tipologia strutturale ha una luce effettiva pari a  $67.10\text{ m}$ ; invece, gli impalcati intermedi hanno una luce pari a  $30.93\text{ m}$ .

La struttura in acciaio è composta per tutto l'impalcato da due travi a doppio T avente sezione costante nelle campate intermedie e variabile negli appoggi con andamento analogo all'impalcato in calcestruzzo armato. All'interno di esse sono presenti dei controventi rispettivamente: a V rovescia per le campate rettilinee e a croce di Sant'Andrea nell'impalcato a sezioni variabili. Le luci degli impalcati sono rispettivamente  $32.73\text{ m}$  per le campate rettilinee e  $66.20\text{ m}$  per le travi a sezione variabile.

Come è stato descritto precedentemente nella prima fase, la modellazione è avvenuta a step cercando di mantenere il più possibile una metodologia per avere un risultato coerente finale.

Nella fase iniziale è stato importante concentrarsi sullo studio della documentazione tecnica e delle indagini fotografiche in modo da prevenire le criticità e elaborare un piano di modellazione. La modellazione della struttura è stata pensata in modo da essere in linea con quella avvenuta nella

prima fase, infatti, un errore dovuto al posizionamento nel tracciato avrebbe portato alla indisponibilità di poter unire i due modelli nella fase successiva.

I primi elementi strutturali ad essere stati modellati sono stati le spalle e le pile in modo da poter definire una quota iniziale adeguata e non incorrere in errori in fase di modellamento dell'impalcato. Le tavole grafiche hanno permesso di interrogare le quote nei vari punti in questo modo, confrontando con l'impalcato a Nord, sono state definite le quote di progetto reali e attendibili con l'altro modello.

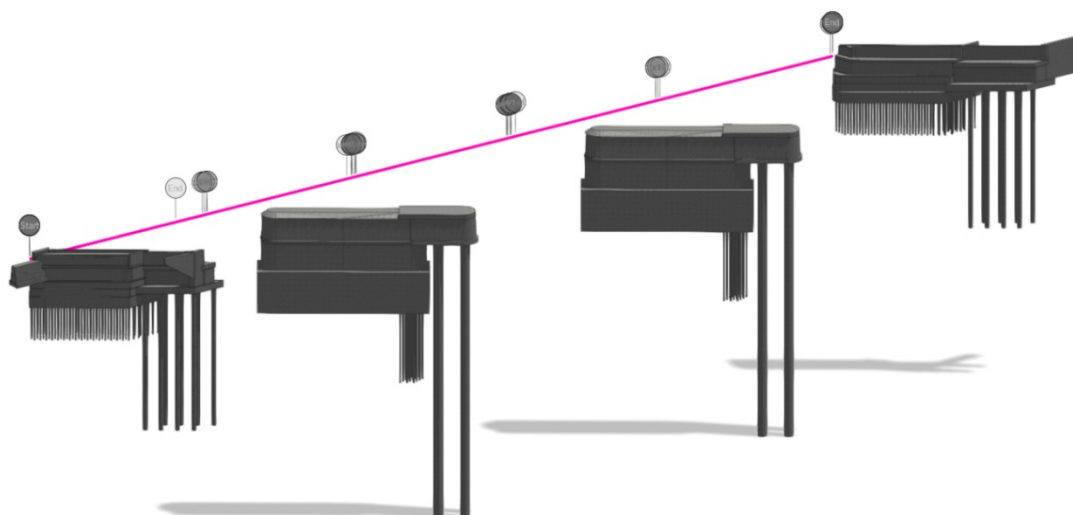


Figura 53 - Spalle e pile impalcato Sud

Successivamente si è passato alla modellazione dell'impalcato di calcestruzzo, esso è risultato più difficile da gestire per via dell'estensione longitudinale del cassone e quindi è stato necessario creare: inizialmente due *Curve Libraries* una dedicata all'anima del cassone e l'altra alle solette superiori ed inferiori e successivamente i traversi interni come *Point Libraries*.

L'impalcato intermedio è risultato di semplice modellazione essendo delle travi longitudinali senza cambi di sezione.

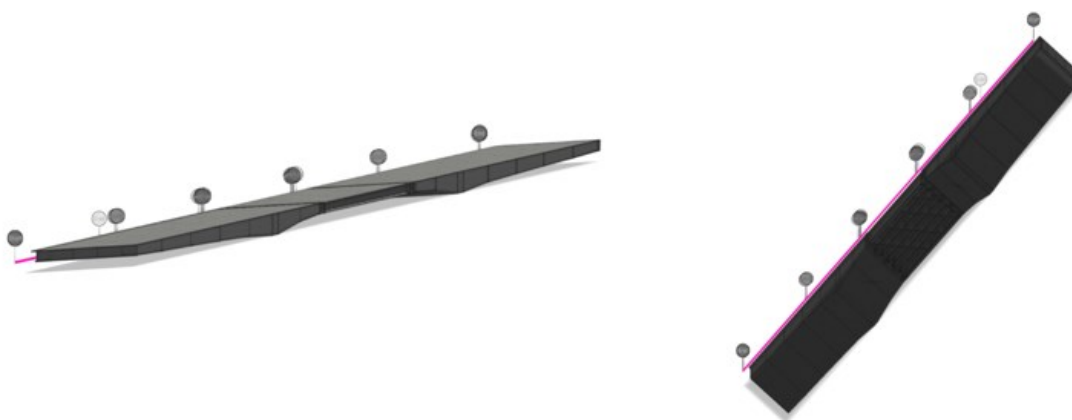


Figura 54 - Impalcato calcestruzzo armato ponte Sud

Terminata la modellazione del calcestruzzo armato è stato necessario ricercare la documentazione storia della struttura in acciaio, essendo diversa dalla precedente per via

dell'ampliamento strutturale. Essa è risultata la parte più lunga ed impegnativa dell'intera modellazione, infatti, la trave con sezione variabile ha portato alla creazione di un totale di otto differenti controventature avendo dei continui cambi di quota e di posizione. Per ottimizzare le prestazioni a livello di tempo e di pesantezza del file è stato necessario ruotare l'impalcato in modo da non avere un numero eccessivo di *Point Libraries* presenti nel modello. Sono stati modellati gli elementi di appoggio tra: travi-spalle, travi-pile e selle Gerber. Le bullonature e gli elementi di ancoraggio non sono stati modellati.

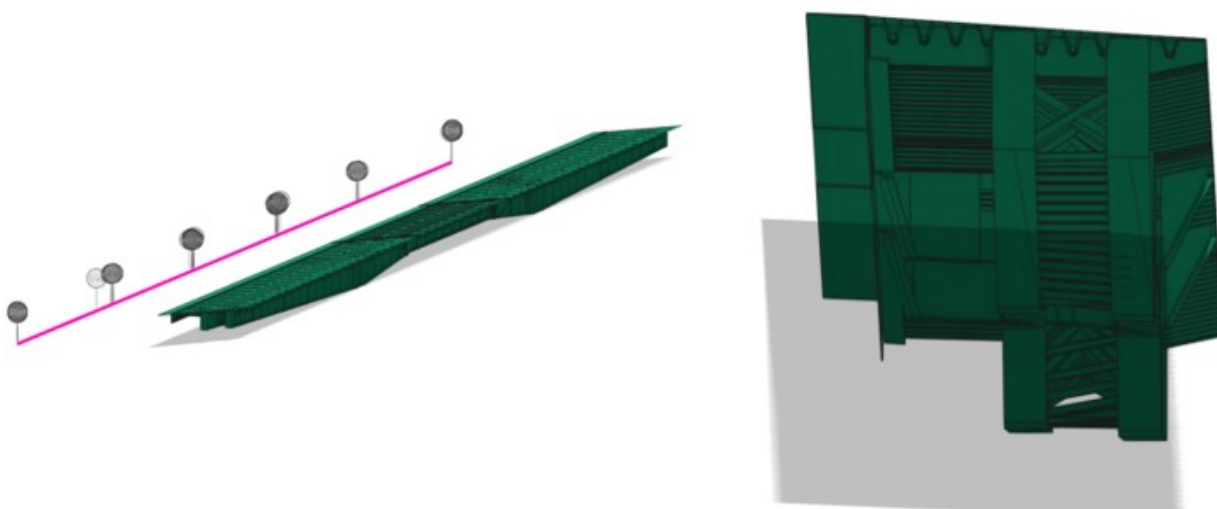


Figura 55 - Impalcato in acciaio ponte Sud

Modellati gli elementi portanti in acciaio e in calcestruzzo è stato necessario ricreare gli elementi non strutturali comprensivi di: barriere di sicurezza con marciapiede, manto stradale e entità delle indagini in situ. Per questo impalcato non sono state destinate delle indagini di monitoraggio future.

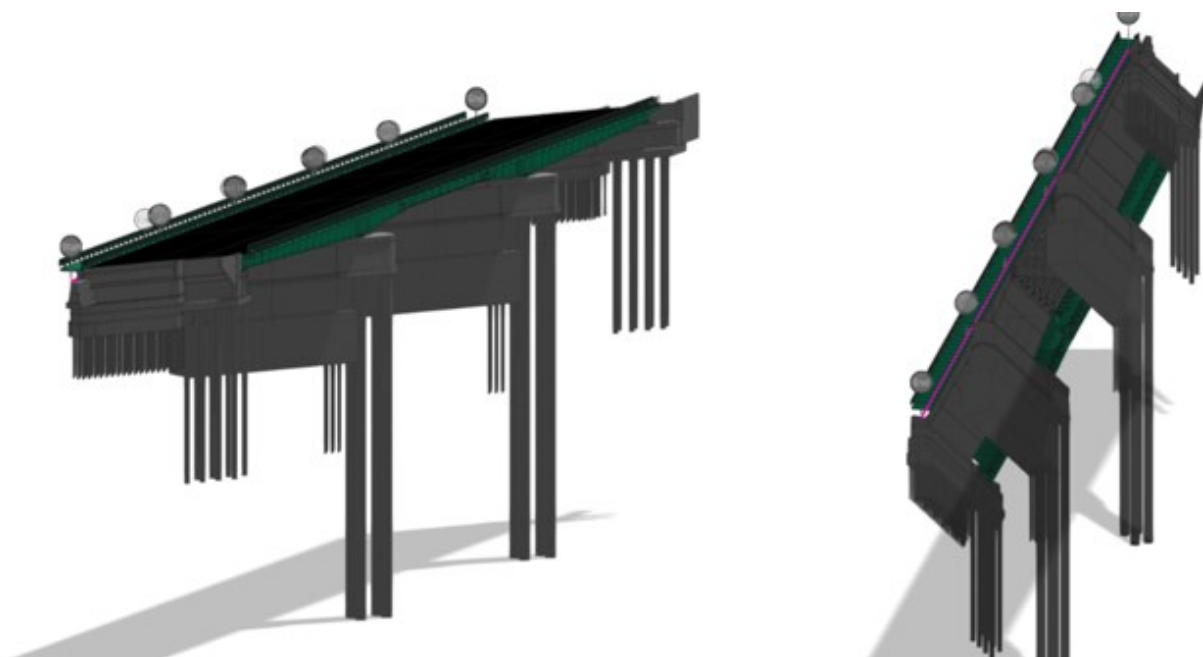


Figura 56 - Impalcato Sud

### 2.3. TERZA FASE

Terminata la modellazione dei due impalcati, è stato necessario esportare separatamente ogni singola *Assembly Unit* localmente sul dispositivo di archiviazione in modo da avere, un backup per un possibile danneggiamento e per la successiva importazione nel nuovo progetto.

Inizialmente sono stati creati tutti i tracciati in modo da poter inserire senza alcun problema le *Assembly Unit* dei due progetti. Successivamente sono stati importati tutti i singoli impalcati all'interno del progetto, con un processo di importazione molto veloce e speditivo del software, in modo da ricreare il modello informativo all'interno di un unico progetto globale.

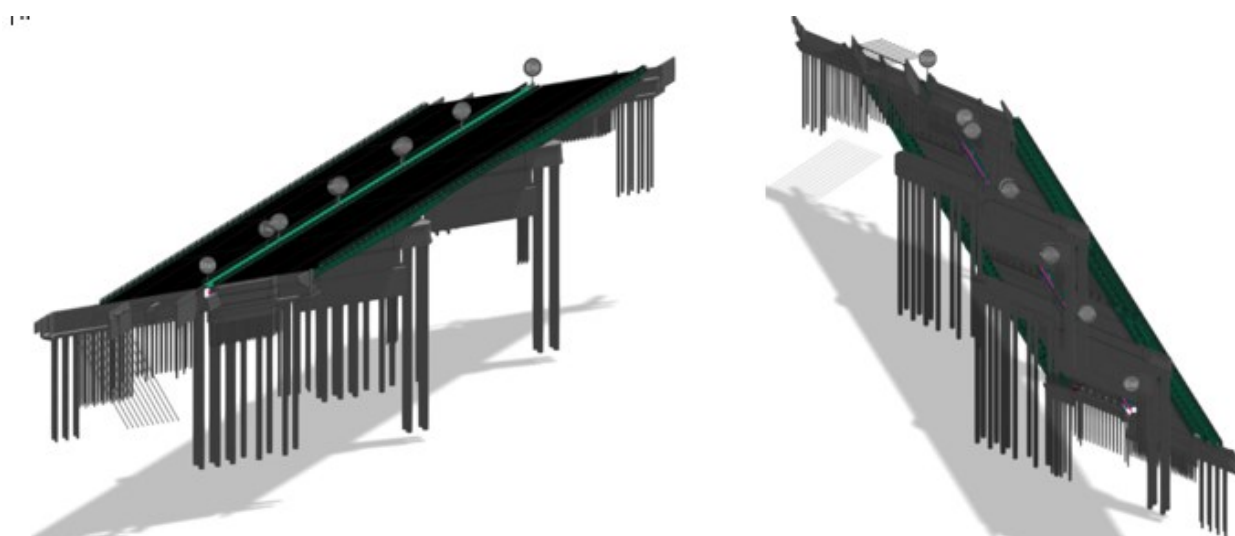


Figura 57 - Modello globale del ponte

Alla fine, è stato necessario creare una gerarchia strutturale della struttura. Questo processo è estremamente importante per poter gestire il ponte nelle fasi successive e poter selezionare solo quello che è strettamente necessario andare ad analizzare. Il ponte è stato suddiviso inizialmente in due macrocategorie Nord e Sud. All'interno di ognuno di esse è possibile ritrovare quattro macrocategorie riguardanti: sovrastruttura, sottostruttura, sensori e indagini in situ.

Il campo riguardante la sovrastruttura è a sua volta suddiviso in struttura in acciaio e in calcestruzzo armato in modo da poter interagire singolarmente con tutte le campate del ponte a seconda della tipologia strutturale. All'interno di questi campi è possibile isolare anche gli elementi dedicati ai dispositivi di appoggio.

La sottostruttura è composta da pile e spalle e si differiscono a seconda della loro posizione verso le direzioni di Padova o Venezia.

Infine, i sensori e le indagini in situ sono suddivisi in base alla tecnologia, potendo selezionare singolarmente ogni singolo elemento riguardante una determinata categoria.

Questo passaggio è di estrema di importanza nella fase di esportazione; permette ai visualizzatori opensource di selezionare più elementi contemporaneamente in modo da avere delle

categorie già prestabilite dal modellatore e facilitare l'introduzione delle informazioni nelle piattaforme di gestione.

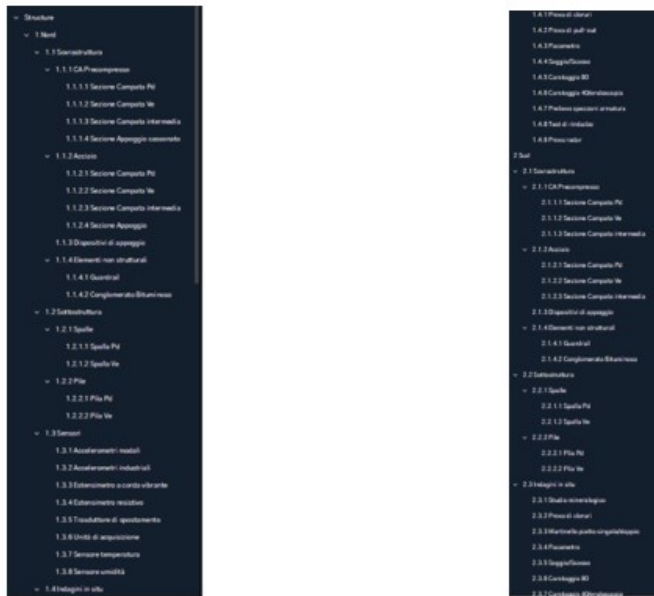


Figura 58 - Gerarchia strutturale

### 3. ESPORTAZIONE IN FORMATO APERTO .IFC

IFC (Industry Foundation Classes) è un modello di standard, creato e mantenuto da buildingSmart International, per lo scambio in formato aperto di modello BIM. Esso impone di organizzare le informazioni contenute in un modello BIM secondo un modello di dati. Lo schema, scritto in linguaggio di programmazione *EXPRESS*, è composto principalmente dalle entità e dai relativi attributi.

Il formato supportato dal software Midas CIM è *IFC4 ADD2 TC1* ed è l'attuale standard ufficiale. A livello di infrastrutture ponti e viadotti, il progetto IFCBridge ha rielaborato la versione *IFC4.3* che attualmente ha lo status di *candidate standard*, in attesa di essere verificato e successivamente approvato. Questo processo prevede che venga accolto dall'intera comunità di buildingSmart e che venga testato da alcuni produttori di software

L'esportazione nel formato aperto è avvenuta in più step, infatti, il software permette di modificare particolari parametri che permettono di modificare la qualità di esportazione. Prima di tutto è possibile selezionare la gerarchia strutturale in modo da poter categorizzare ogni elemento strutturale in fase di visualizzazione in modelli esterni. Sono presenti diversi parametri legati alla geometria potendo modificare sia gli aspetti legati agli elementi strutturali e sia alle componenti sugli elementi integrativi come barre di armatura o bullonature:

- *Curved Member, Curved Face, B-Spline Path*: sono delle impostazioni legati alle geometrie dei corpi curvi;
- *Primitive Solid*: definisce la tipologia di rappresentazione delle geometrie solide ed è suddiviso in; CSG 3D, solido estruso, solido sfaccettato;
- *Rebar*: imposta la tipologia di geometria delle barre di armature lenta;
- *Tendon*: imposto il tipo di geometria legato ai trefoli o barre da precompressione;
- *Template section*: imposta il tipo di geometria di un oggetto che ha utilizzato la sezione del modello per la conversione.

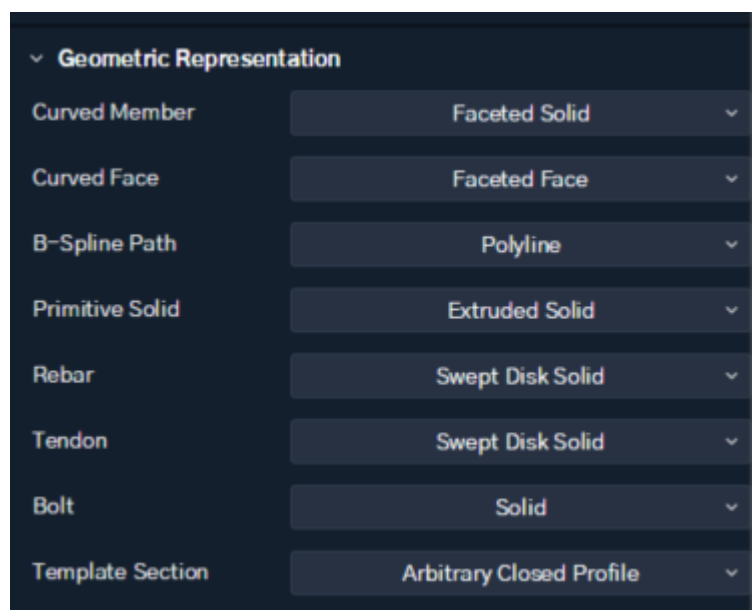


Figura 59 - Parametri di esportazione geometrici .IFC

*Tessellation* esso definisce la precisione di esportazione del modello aumentando o riducendo la mesh. Esso è un parametro molto importante perché influisce sulla qualità e sulla pesantezza del file. Con una esportazione molto fitta i file sono arrivati a pesare sui *1.5Gb*, invece, riducendola quasi al minimo il documento è risultato pesante in meno quasi dell'80%.

Una prima considerazione riguarda questo valore, per l'esportazione in altri software commerciali, è consigliato usare delle mesh molto fitte in modo da non perdere importanti informazioni geometriche, nel caso di condivisione in piattaforme di gestione non è importante avere dei modelli accurati essendo soltanto rappresentativi ma è necessario non appesantire ulteriormente il sistema in modo da poter essere gestito in qualsiasi situazione.

I visualizzati opensource impiegati per questo tipo di verifica sono: *BIMVision* e *FZKViewer*. In entrambi i casi hanno risposto molto bene e la qualità di informazioni contenute e visualizzate sono rispecchianti del modello originale. È stato possibile per entrambi visualizzare la gerarchia strutturale potendo selezionare singolarmente, tramite la struttura di IFC, ogni singola macrocategoria.

Sono sorti dei problemi legati al nodo delle selle Gerber e all'inclinazione del manto stradale superiore non essendo state esportate correttamente, ma a livello di condivisione in piattaforme di condivisione è un dato strettamente non indispensabile.

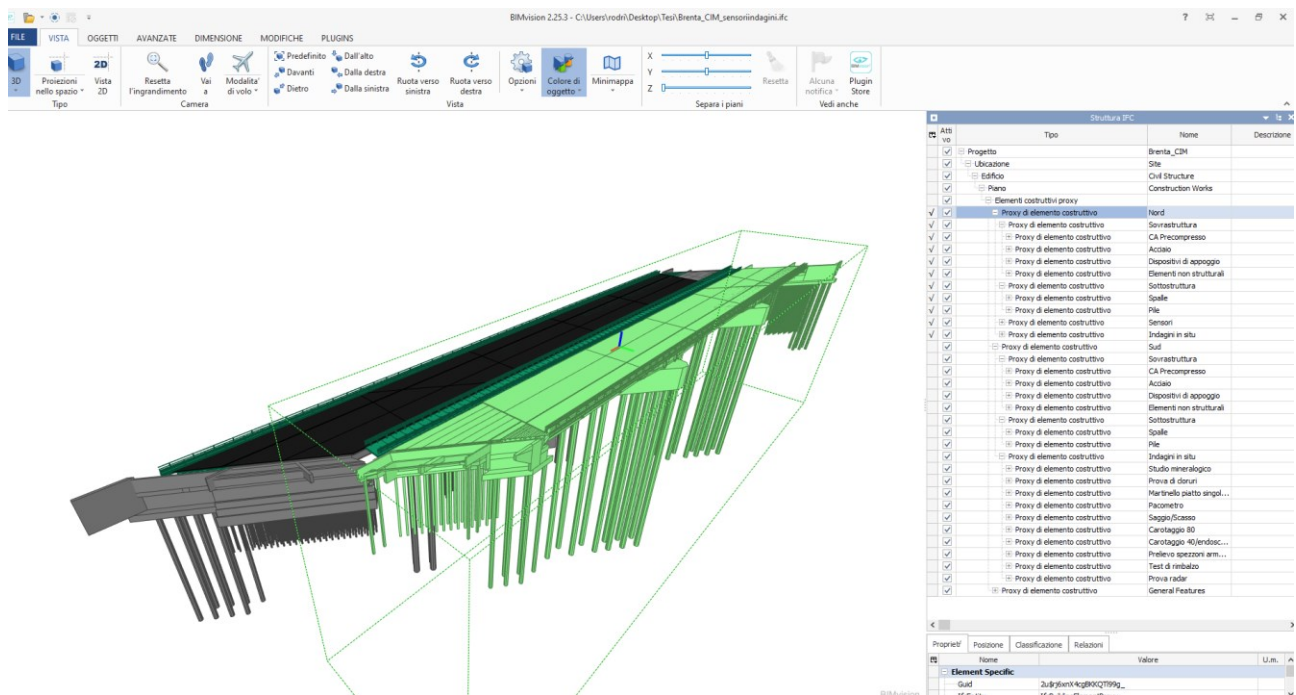


Figura 60 - Selezione impalcato Nord impiegato il software Open Source BIMVision

Terminata la verifica sulla rappresentabilità del modello è stato necessario modificare le impostazioni legate all'esportazione in modo da ottimizzare il file .IFC.



Le verifiche effettuate sono state sette in totale, modificando i valori legati alla geometria strutturale e al grado di precisione. Non sono stati considerati gli elementi legati alle barre di armatura lenta e precompressa e alle bullonature non essendo importanti in questa fase.

Per quasi la totalità delle impostazioni gli output attesi sono stati più che soddisfacenti, soltanto modificando le *Curve Member*, *Curved Face* e *Template Section* i modelli hanno riscontrato degli errori grossolani nel momento in cui si sono modificate le impostazioni consigliate dal software.

Il modello con la migliore qualità grafica e di informazioni adatto per una corretta condivisione nelle piattaforme ha le seguenti caratteristiche:

- Curved Member: *Faceted Solid*;
- Curved Face: *Faceted Face*;
- B-Spline Path: *Polyline*;
- Primitive Solid: *Extrude Solid*;
- Tessellation: 30;
- Output data file: 332 Mb.

Modello	Categorize Target	Curver Member	Curved Face	B-Spline Path	Primitive Solid	Rebar	Tendon	Template Section	Tessellation	File Size	Mb
A1	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	Polyline	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	5 OK+		1478
A2	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	Polyline	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	15 OK+		549
A3	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	Polyline	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	30 OK+		332
B1	Structure	Swept Area Solid	Faceted Face	Polyline	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	30 NO		331
C1	Structure	Faceted Solid	Curved Surface	Polyline	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	30 NON CARICA IL FILE		302
D1	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	B-Spline with kr	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	30 OK		332
E1	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	Polyline	CSG 3D	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	30 OK		332
E2	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	Polyline	Faceted Solid	Swept Dis	Swept Dis	Arbitrary Closed Profile	30 OK+		332
F1	Structure	Faceted Solid	Faceted Face	Polyline	Extrude Solid	Swept Dis	Swept Dis	Parameterized Profile	30 NO		331

Figura 62 - Combinazione dei parametri di esportazione in formato .IFC

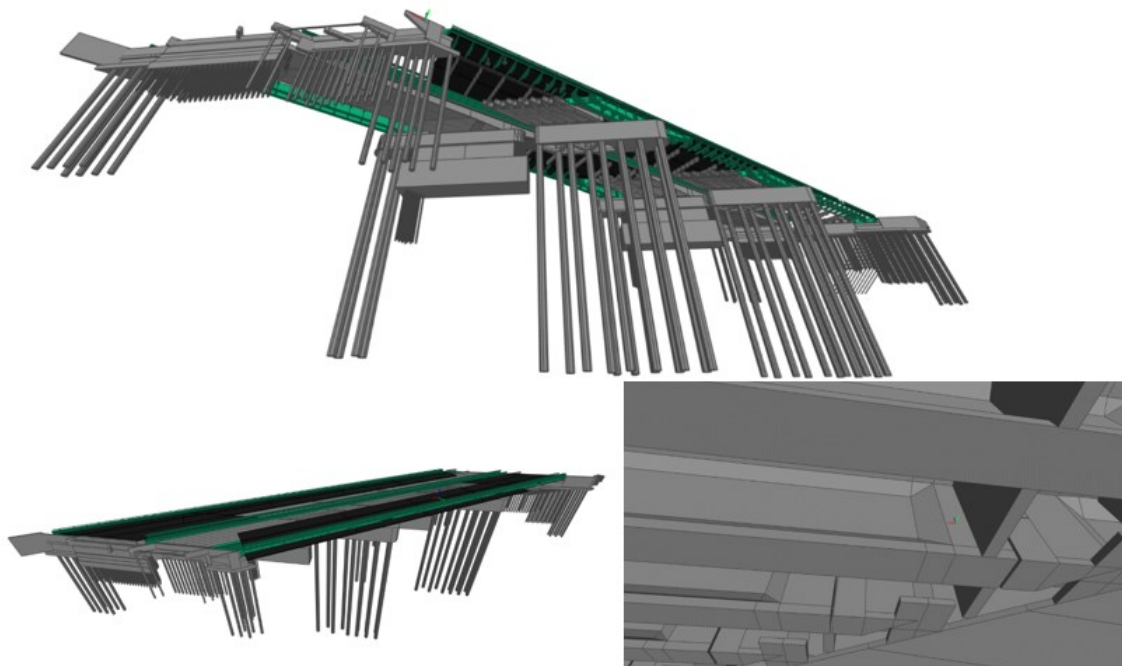


Figura 61 - Errori riscontrati modificando alcuni parametri di esportazione

Un Sistema di Gestione dei Ponti o *Bridge Management System* (BMS) permette di definire inventari e database di ispezione, prevedere futuri scenari di ammaloramento grazie all'impiego di modelli di deterioramento e, conseguentemente pianificare gli interventi di manutenzione, riparazione e riabilitazione strutturale ottimizzando le tempistiche ed i costi.

Le informazioni su cui si basa il funzionamento dell'intero processo sono contenute all'interno di un *database* informatico e comprendono:

- *Dati di inventario*: l'identificativo del ponte attraverso il codice *AINOP*, la sua localizzazione geografica, informazioni sulle costruzioni e interventi passati, aspetti amministrativi e una pianificazione degli interventi di manutenzione;
- *Informazione sullo stato di condizione generale*: definiscono lo stato del degrado del ponte sulla base di indagini e studi pregressi;
- *Informazioni sullo stato di condizione specifico*: definiscono lo stato del degrado sui singoli elementi costituenti la struttura e ne riportano le caratteristiche generali;
- *Rappresentazione dell'opera*: attraverso l'impiego di modelli informativi è possibile rappresentare l'infrastruttura riuscendo ad interrogare gli elementi costruttivi;
- *Dati relativi al monitoraggio continuo*: definendo le tipologie di sensori impiegate e l'output caratteristico opportunamente filtrato;
- *Modelli di calcolo*: forniscono informazioni sull'opportunità e la convenienza di un intervento attraverso modelli di degrado, manutenzione, costo e di affidabilità;
- *Dati di network-level*: si tratta di informazioni che non fanno riferimento ad un singolo manufatto ma sono relative all'intero patrimonio o ad un gruppo di ponti con lo stesso schema strutturale o tecnologia costruttiva.

Nel sistema di gestione un ponte può essere identificato da un serie di dati che possono essere specifici dell'insieme o dettagliati per ogni singolo elemento, esso può essere suddiviso in quattro livelli:

- *Dati di primo livello*: struttura dei dati predefinita e comune a tutte le opere presenti sul territorio;
- *Dati di secondo livello*: indicano le caratteristiche del territorio in ambienti *GIS* dove è posizionato l'impalcato;
- *Dati di terzo livello*: struttura dei dati variabile per ogni opera e rappresenta la modellazione elementare del ponte suddividendolo in più sottoinsiemi;
- *Dati di quarto livello*: sono delle entità che vengono integrate sugli elementi come i sensori, fotografie con uso di *placeholder* ed indagini in situ.

Lo studio delle *Linee Guida* ha permesso di estrapolare molti di questi dati ed allocarli internamente in ogni sottoinsieme. Il processo di studio si è focalizzato sul sintetizzare il documento in una unica *flow-chart* indicativa analizzando cosa è necessario condividere e dove poterlo allocare.

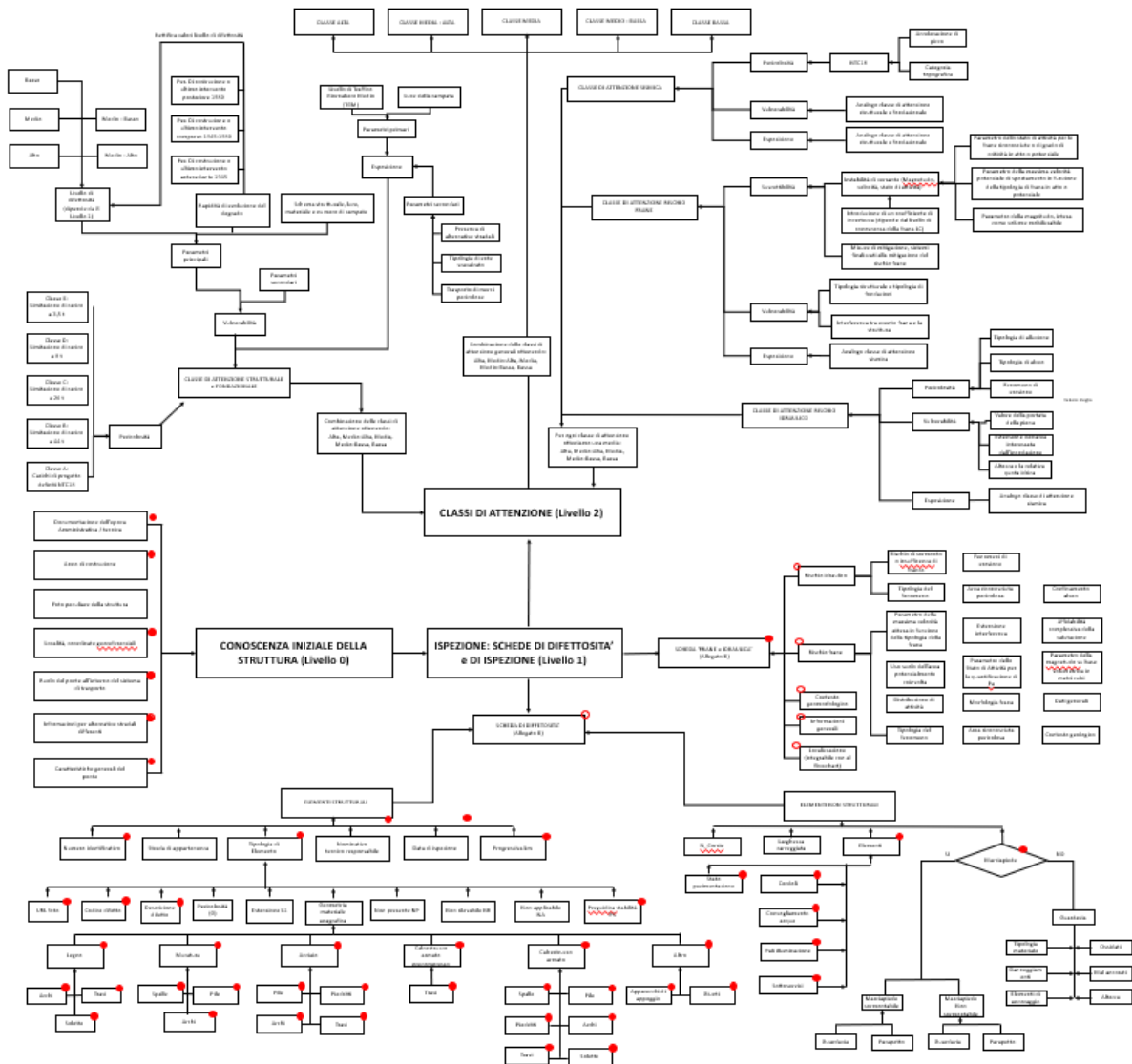


Figura 63 - Flow-chart sui primi due livelli delle linee guida

La maggior parte dei dati sono inclusi nei primi due livelli, dove sono presenti: tutte le informazioni caratteristiche della struttura ponte, documenti necessari per una corretta ispezione ed analisi del danno e tipologia di elementi da considerare in fase di catalogazione.

In questa fase, gli unici dati che non risultano essere indispensabili in un ambiente di condivisione dei dati sono le metodologie per la determinazione delle classi di attenzione. La conoscenza della struttura viene rappresentata dall'indice finale della classe di attenzione e risulterebbe oneroso, ai fini computazionali, rappresentare ogni parametro in un BMS. Essi possono essere esplicitati in documenti e condivisi come un unico formato a livello di struttura.

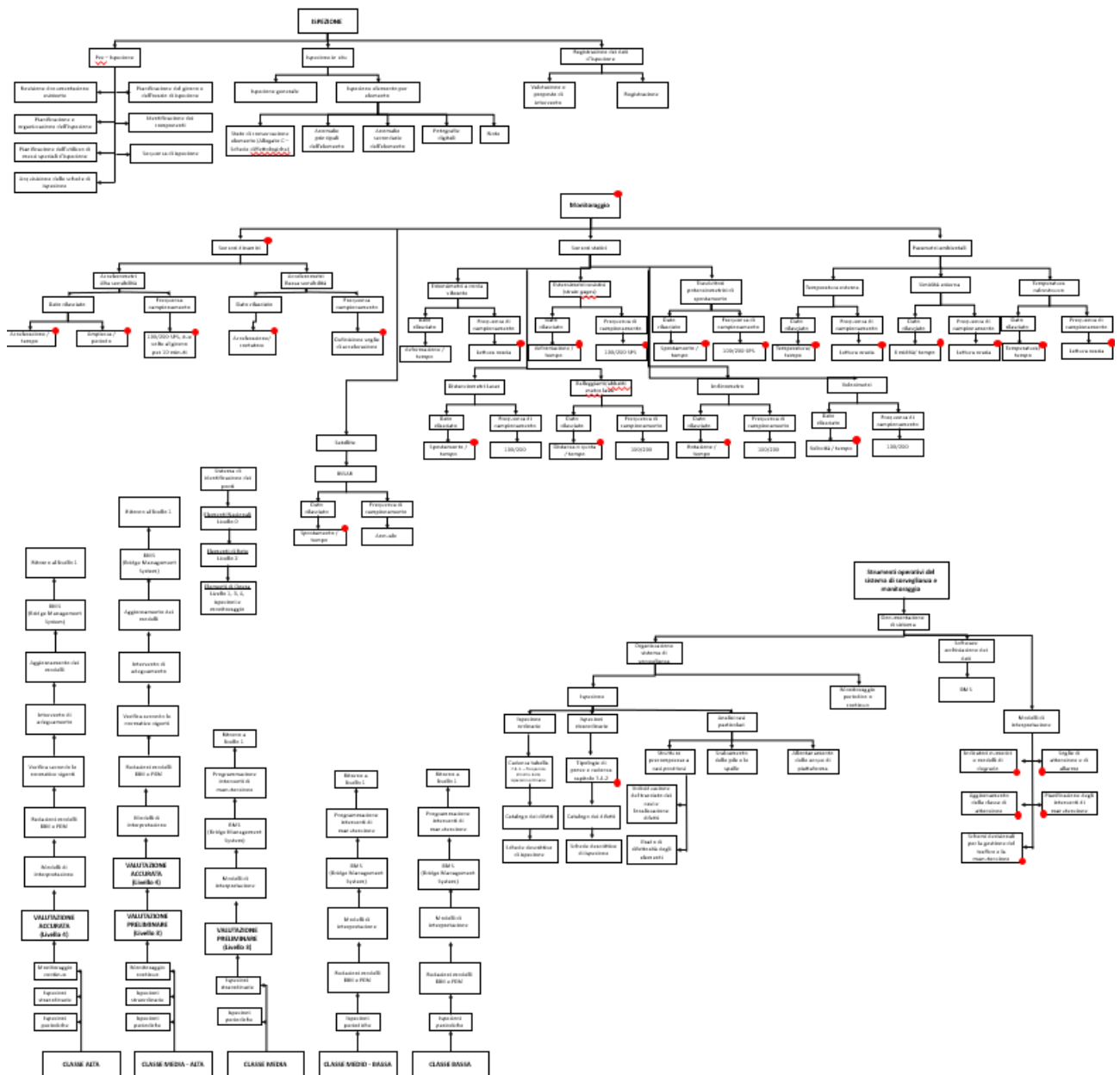


Figura 64 - Flowchart livello 3,4 e 5

Determinata la classe di attenzione, il processo di analisi strutturale dipende esclusivamente dai tipi di danneggiamento presenti sugli elementi e dal grado di vulnerabilità del ponte. Molte di queste informazioni non vengono introdotte all'interno delle piattaforme di condivisione, infatti, sono frutto di studi laterali e permettono di comprendere ed intervenire sulla struttura.

I modelli di interpretazione, l'analisi dei dati di monitoraggio e le criticità riscontrate successivamente dalle ispezioni; vengono interrogati all'interno di una piattaforma di gestione essendo delle informazioni importanti per conoscere l'infrastruttura: non solo in fase di consultazione ma anche per una predizione sullo stato di salute.

Successivamente verranno descritti in dettaglio tutti i dati riprendendo le caratteristiche peculiari e la rappresentabilità sulle piattaforme di gestione.

## 1. DATI DI PRIMO LIVELLO

I dati di primo livello caratterizzano in modo generale la struttura e permettono di individuare in modo univoco il ponte tra tutti quelli presenti nell'insieme.

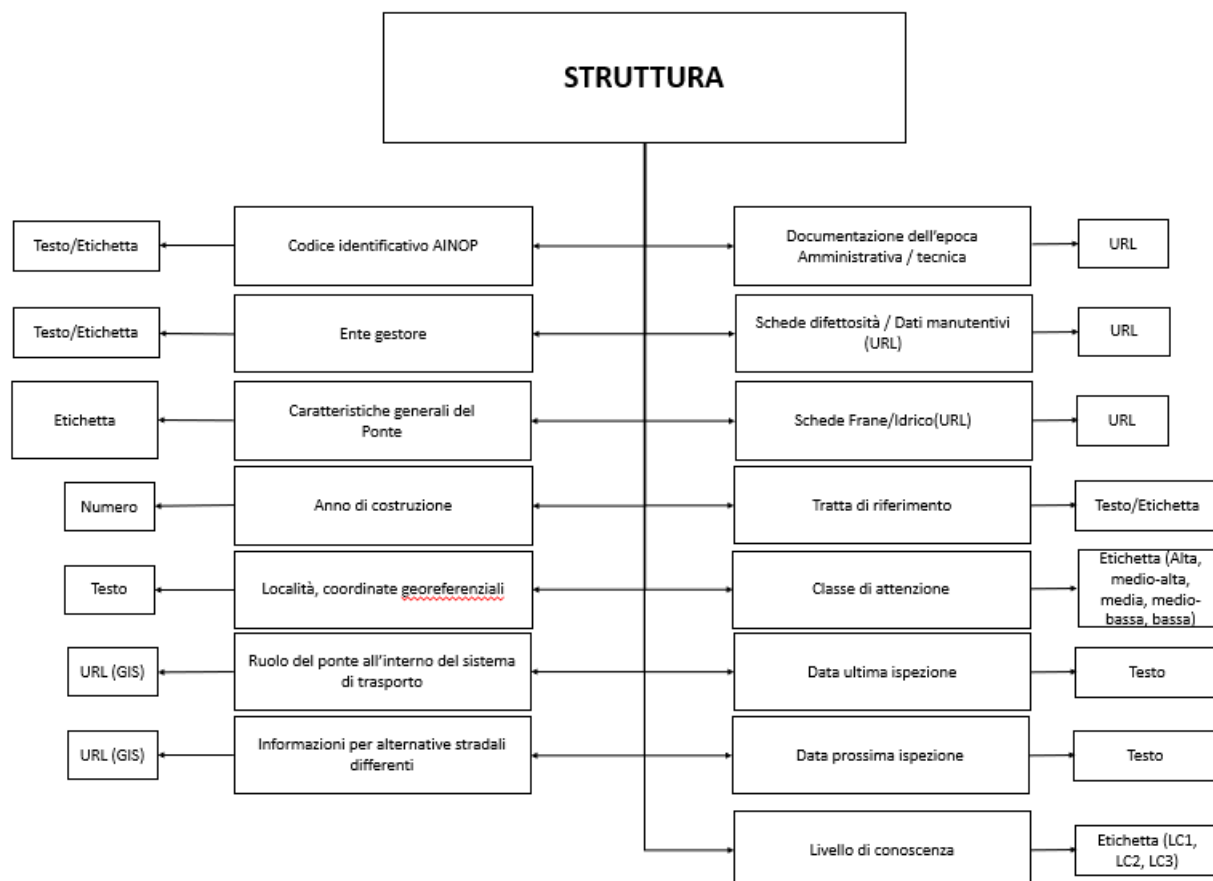


Figura 65 - Dati di primo livello

*Codice identificativo AINOP.* Ad ogni opera viene assegnato un codice "Identificativo Opera Pubblica" che contraddistingue e identifica in maniera univoca l'opera medesima nel complesso. Esso può essere rappresentato attraverso l'impiego di un formato testo, nel momento in cui non si abbia a disposizione un database ultimato, o un'etichetta dove è possibile selezionare il codice del ponte.

*Ente gestore.* Esso fa riferimento all'ente proprietario dell'opera, può essere visualizzato o compilando un testo manualmente o selezionando un'etichetta già presente nel database.

*Caratteristiche generali del Ponte.* Essa fa riferimento alla tipologia maggiormente rappresentativa dell'opera ed è di fondamentale importanza nelle indagini per la programmazione degli interventi di manutenzione. Può essere rappresentata con un'etichetta potendo selezionare le seguenti tipologie: Ponti a travata (ginder), Ponte ad arco (arched), Ponte di attraversamento canali (culvert), Ponte strallato (clabe stayed), Ponte sospeso (suspension), Ponte reticolare (truss) e Ponte generico.

*Anno di costruzione.* Indica l'anno della prima costruzione del ponte, se non è presente una documentazione che attesti il dato è opportuno stimarlo in modo da avere un'idea preventiva sulle tecniche di costruzione e materiali adottati. Esso può essere definito come un enumerativo.

*Località, coordinate georeferenziali.* Esse permettono di posizionare e contestualizzare l'opera nel territorio. La rappresentazione avviene attraverso la compilazione manuale con formato testo.

*Ruolo del ponte all'interno del sistema di trasporto, informazioni per alternative stradali differenti e tratta di riferimento.* Permette di identificare l'opera nel territorio dandogli un'importanza, in modo da non causare disagi rilevanti ad attività economiche e sociale ed individuare percorsi alternativi in modo da poter pianificare preventivamente possibili vie preferenziali in caso di manutenzione o interventi. Essendo un'informazione di tipo territoriale è possibile ricondursi all'ambito GIS attraverso una stringa che identifica un indirizzo di una risorsa esterna tramite URL.

*Documentazione dell'epoca Amministrativa/tecnica.* La possibilità di poter interrogare un database esterno contenente le documentazioni, permette di ricostruire le vicende e le trasformazioni subite dall'opera nel corso degli anni e verificarne istantaneamente le caratteristiche. Le informazioni arrivano da un database esterno dove sono contenuti all'interno le documentazioni, Esso ha lo scopo di non appesantire il sistema condividendo ogni singolo file, è opportuno ricondursi ad una stringa esterna URL.

*Schede di difettosità/ Scheda frane - idrico / Dati manutentivi.* Per poter riconoscere ed interpretare un possibile danno è necessario analizzare le schede di difettosità pregresse o, in caso di prima ispezione, poter condividere il contenuto in un unico documento. La *timeline* di tutti gli interventi ispettivi o di manutenzione pregressi è altrettanto importante nel processo di consultazione permettendo di analizzare la cadenza degli interventi passati o di pianificarne di nuovi. Attualmente è possibile creare direttamente all'interno delle piattaforme di gestione dei flussi di manutenzione impostando una cadenza ed avvisando preventivamente l'ispettore. La compilazione delle schede di difettosità è possibile impostarla direttamente all'interno del BMS redigendo manualmente i campi in una sezione dedicata. Nel caso in cui non si potesse interrogare direttamente i singoli campi è opportuno ricondursi a un database esterno dove saranno condivisi direttamente i documenti reperibili tramite stringhe URL.

*Classe di attenzione.* La Classe di Attenzione è una stima approssimata dei fattori di rischio, utile per definire un ordine di priorità per un possibile approfondimento delle indagini/verifiche/controlli. A livello di piattaforma di gestione è necessario condividere il dato finale in modo da avere una stima generale sulla condizione della struttura; può essere espresso con una etichetta: Classe Alta, Classe Media – Alta, Classe Media, Classe Medio – Bassa e Classe Bassa.

*Data dell'ultima ispezione.* Esso è un valore descrivibile come un testo e indica l'ultima ispezione effettuata.

*Data prossima ispezione.* Anch'esso è un valore descrivibile come un testo e permette di identificare la futura ispezione avvertendo preventivamente l'ispettore con un alert da applicazione o via posta elettronica.

*Livello di conoscenza.* Il Livello di conoscenza è il grado di approfondimento della conoscenza della struttura raggiunto dall'ispettore. Esso dipende dal numero di documenti storici / amministrativi reperiti, dal tipo di ispezione che è stata svolta e dalle informazioni legate alle caratteristiche dei materiali esaminate da indagini in situ. Può essere descritto con l'impiego di un'etichetta: LC1, LC2 e LC3.

## 2. DATI DI SECONDO LIVELLO

I dati di secondo livello sono caratteristici del territorio delimitante la struttura. Essi vengono ricollegati a dei sistemi informativi geografici GIS, associando i dati alla loro posizione spaziale.

Alcune delle informazioni sono caratteristiche dell'insieme e descrivono alcuni parametri comuni. Successivamente si ha suddivisione delle informazioni: rischio idraulico e frane.

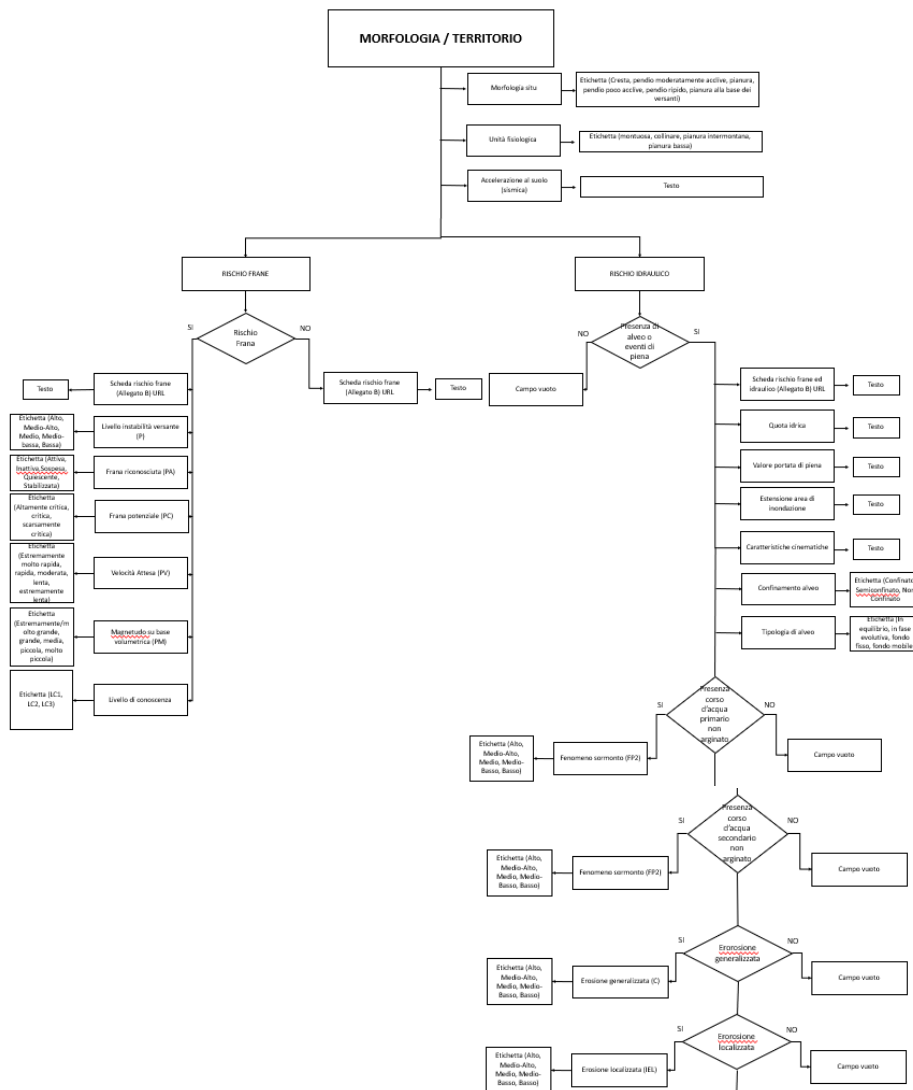


Figura 66 - Dati di secondo livello

*Morfologia situ.* Essa indica la caratteristica predominante del territorio delimitante la struttura, può essere definita tramite un'etichetta: Cresta, Pendio moderatamente acclive, Pendio poco acclive, Pendio ripido, Pianura alla base dei versanti e Pianura.

*Unità fisiologica.* Indica una porzione di territorio geograficamente definita che presenta un caratteristico assetto fisiografico. Esso viene definito tramite un'etichetta: montuosa, collinare, pianura intermontana, pianura bassa.

*Accelerazione al suolo sismica.* Essa è la misura della massima accelerazione del suolo indotta da terremoto e registrata dagli accelerometri. Il valore che viene ricavato dall'ispettore può essere assegnato all'interno della piattaforma di gestione come testo.

## 2.1. RISCHIO FRANE

Nelle Linee Guida la Classe di Attenzione associata al rischio frane tiene conto di alcuni specifici parametri che indicano il livello di coinvolgimento della struttura in eventuali fenomeni franosi. È indispensabile capire cosa è necessario condividere all'interno delle piattaforme di gestione in modo da fare comprendere all'ispettore le problematiche legate al situ.

Come primo aspetto si deve capire se la struttura è a rischio frane, nel caso non lo fosse è importante specificarlo con un'azione *Booleana* e condividere, attraverso una stringa URL, il documento legato alla scheda rischio frane.

Nel caso il ponte avesse delle criticità riguardanti questi fenomeni è consigliato condividere, come primo parametro, il documento scheda rischio frane come stringa URL.

*Livello instabilità versante.* Il livello di instabilità versante è un coefficiente dato dalla somma di tre parametri: stato di attività per le frane riconosciute  $P_A$ , grado di criticità per le frane potenziali  $P_C$ , massima velocità potenziale di spostamento in funzione della tipologia di frana o potenziale  $P_V$  e il volume mobilizzabile definito magnitudo  $P_M$ . All'interno delle piattaforme di gestione risultano essere dei parametri molto importanti per poter rappresentare i problemi legati al versante, tutti i coefficienti possono essere descritti attraverso delle etichette:

- *Livello di instabilità del versante complessivo:* Alto, Medio – alto, Medio, Medio – basso e basso;
- *Stato di attività per frane riconosciute  $P_A$ :* Attiva, Inattiva, Sospesa, Quiescente, Stabilizzata;
- *Grado di criticità per le frane potenziali  $P_C$ :* Altamente critica, Critica, Scarsamente critica;
- *Massima velocità potenziale di spostamento in funzione della tipologia di frana o potenziale  $P_V$ :* Estremamente molto rapida, Rapida, Moderata, Lenta, Estremamente lenta;
- *Volume mobilizzabile definito magnitudo  $P_M$ :* Estremamente/molto grande, Grande, Media; Piccola, Molto piccola.



*Livello di conoscenza.* Il livello di conoscenza, come per tutti gli elementi strutturali e no, risulta un fattore molto importante per la conoscenza dei versanti. Esso può essere descritto impiegando un'etichetta: LC1, LC2 ed LC3.

## 2.2. RISCHIO IDRAULICO

Il rischio idraulico si intende la probabilità di subire conseguenze dannose al territorio circostante l'impalcato e alla struttura a seguito di un evento legato ad un corso d'acqua. Esso è uno dei fattori che determina i più importanti danni o crolli di ponti esistenti, data l'interazione tra la corrente fluviale e la struttura che può portare a malfunzionamenti o a cedimenti dell'opera.

Il rischio idraulico si può ritenere assente per strutture che non abbiano corsi d'acqua sottostanti e, nel caso di evento di piena, elementi strutturali che non vadano ad interessare l'alveo;

*Scheda rischio frane ed idraulico (Allegato B).* Il presente documento permette di avere una prima conoscenza delle caratteristiche idrogeologiche dell'ambiente, esso può essere condiviso all'interno delle piattaforme di gestione attraverso una stringa URL esterna per ricollegarci al documento.

*Quota idrica.* La quota idrica è un valore numerico che permette di determinare il livello dell'acqua dei fiumi. La condivisione di questo parametro può essere introdotta manualmente e può definire il valore medio del pelo del fiume o, se accompagnata da sistemi di monitoraggio, può essere continuamente aggiornata definendo dei valori reali che possono essere confrontati con degli alert prestabiliti dall'ispettore. Il dato all'interno della piattaforma di gestione può essere di tipo numerico o testuale a seconda della presenza o meno di un sistema di monitoraggio continuo.

*Valore di portata massima di piena.* La portata massima di piena è il massimo evento registrato nella storia del corso d'acqua. Il seguente dato può essere indicato facendo riferimento a degli eventi storici registrati o può essere definito dall'ispettore in fase di analisi della struttura per le problematiche legate al possibile danneggiamento dell'opera. Esso può variare a seconda della condizione strutturale o può essere aggiornato in modo continuo introducendo dei sensori dedicati sulla struttura o sul letto del fiume. Il valore atteso all'interno della piattaforma di gestione può essere testuale o numerico a seconda dell'impiego di sistemi di monitoraggio.

*Estensione dell'area di inondazione.* Le aree di inondazione sono corrispondenti ai possibili scenari legati all'allagamento temporaneo di un'area. Il dato può essere espresso attraverso un formato testo dove l'ispettore può condividere le informazioni ed integrarle con URL esterni rappresentanti i dati forniti dall'istituzione di appartenenza.

*Caratteristiche cinematiche.* Le caratteristiche cinematiche sono riferite alla corrente. Il valore teorico all'interno delle piattaforme di gestione può essere introdotto dall'ispettore attraverso un testo o ricavato con un monitoraggio di tipo continuo da un sistema di sensori.

*Confinamento alveo.* Un alveo si dice confinato quando le sponde del tratto del fiume risultano essere a contatto con i versanti. Nelle BMS viene condiviso impiegando un'etichetta contenente: Confinato, Semi confinato, Non confinato.

*Tipologia di alveo.* Essa viene descritta all'interno dell'Allegato B e indica la tipologia di alveo legata al proprio movimento nel tempo. Nelle piattaforme di gestione può essere descritta come un'etichetta: In equilibrio, In fase evolutiva, Fondo fisso, Fondo mobile.

*Presenza di corso d'acqua primario e secondario non arginato.* Esso, se è presente in un corso d'acqua, è necessario tener conto del fenomeno del sormonto FP2; può essere integrato all'interno delle BMS attraverso un'etichetta: Alto, Medio – alto, Medio, Medio – basso, Basso.

*Erosione generalizzata C.* Il fenomeno di erosione generalizzata è un processo di abbassamento del fondo dell'alveo. A livello di stabilità strutturale può comportare danneggiamenti rilevati dati dall'abbassamento di pile o spalle in alveo. Esso viene condiviso utilizzando un'etichetta che indica il grado di erosione: Alto, Medio – alto, Medio, Medio – basso, Basso.

*Erosione localizzata IEL.* Il processo di erosione localizzata viene riferito a zone puntali presenti nel modello informativo GIS, come per quella generalizzata, è possibile definirla attraverso un'etichetta: Alto, Medio – alto, Medio, Medio – basso, Basso.

### **3. DATI DI TERZO E QUARTO LIVELLO**

I dati di terzo e quarto livello rappresentano l'informazione elementare del ponte definita per ogni elemento e quindi sono di maggiore dettaglio.

Gli elementi si possono suddividere in due macrocategorie: elementi strutturali e non strutturali. Questa distinzione è di estrema importanza per la definizione dei dati e indagini da svolgere, per i primi è importante conoscere tutte le caratteristiche. Esse sono accompagnate da informazioni ricavate da indagini in situ e da monitoraggi strutturali continui. Questo processo ha lo scopo di identificare i danneggiamenti e, nel momento in cui si va a consultare le piattaforme di gestione, conoscere la tipologia strutturale e interrogarla, analizzando dati interni o esterni alle BMS come documenti tecnici o fotografie.

Per gli elementi non strutturali non risulta essere importante conoscere tutte le caratteristiche dettagliate, ma è essenziale condividere le informazioni generali e le criticità date dai danneggiamenti agli elementi. Il loro malfunzionamento può creare problematiche legate alla fruibilità del traffico o causare dei danneggiamenti estetici ma non compromette la stabilità globale dell'opera.

Lo studio dei dati da implementare all'interno delle piattaforme di gestione deriva dall'analisi dettagliata delle *Linee Guida* e dai suoi *allegati*. In particolare, all'interno delle *Schede di difettosità – Allegato B* sono presenti molte informazioni che permettono di descrivere gli elementi strutturali in modo corretto ed intelligente.



*Tipologia di elemento.* Per tipologia di elemento, si intendono i macrosistemi che portano a caratterizzare l'intero complesso strutturale. All'interno delle piattaforme di gestione sono condivisi tramite etichette e sono: Arco, Trave, Soletta, Spalle, Pile, Piedritti, Traversi, Apparecchi di appoggio, Giunti.

*Materiale.* La definizione di materiale non si intende come sostanza omogenea costituente un elemento, ma nella classificazione si cerca di incorporare le tipologie di elementi note impiegate per la realizzazione dei manufatti. Essi sono composti eterogenei, definiti da uno o più materiali, con caratteristiche fisico meccanico tra di loro anche molto differenti. Essi vengono condivisi come etichette: Legno, Muratura, Acciaio, Calcestruzzo armato, Pre/post compresso, Altro.

*URL foto.* Dalle indagini svolte in situ, è possibile assegnare all'interno del modello dei *placeholder* impiegati per *pingare* la foto assegnata all'elemento strutturale. Esse sono delle rappresentazioni tridimensionali dove è possibile introdurre una forma, per esempio un cono visivo, e hanno lo scopo di creare un oggetto virtuale da poterci assegnare, in questo caso, delle fotografie utilizzando dei link esterni.

*Scheda di difettosità – Allegato B.* Per avere una prima idea su tutti i possibili danneggiamenti interessati ad un singolo elemento strutturale, è possibile condividere nelle piattaforme di gestione una stringa URL con il documento salvato in database esterno. Esso ha lo scopo di non appesantire troppo il modello introducendo ogni singola informazione e poter in qualunque caso interagire con il documento redatto dall'ispettore. Nei nuovi sviluppi legati alle BMS è possibile ritrovare delle schede da compilare direttamente in piattaforma, ma attualmente risulta essere un processo complicato da adottare per via dei troppi output attesi e conviene, redarla manualmente in formato cartaceo e poi successivamente rielaborarla in sede distaccata.

*Pregiudica stabilità.* Gli elementi strutturali con dei danneggiamenti elevati, possono pregiudicare la stabilità dell'impalcato; per questo risulta essere importante, in fase di compilazione, capire se l'elemento ha delle criticità rilevanti oppure no. Nelle BMS è possibile definirlo come un'etichetta o un booleano, rispettivamente con i parametri: Sì, No.

*Schema statico.* Lo schema statico può essere definito a seconda della geometria e dimensioni della sezione, le caratteristiche dei materiali, le condizioni di vincolo e le condizioni di carico. A prima analisi, nelle piattaforme di gestione, è un parametro che permette all'ispettore di avere un'idea iniziale sul concetto strutturale. Esso viene descritto attraverso una compilazione in formato testo, in modo da poter descrivere i ragionamenti e risultati ottenuti dall'ispettore, in fase di ispezione e studio della documentazione tecnica.

*Elemento ispezionato.* Per gli elementi che pregiudicano stabilità o con dei gradi di danneggiamento rilevanti, è opportuno effettuare delle ispezioni visive dettagliate. In piattaforma di gestione inizialmente si deve definire se l'elemento è stato ispezionato oppure no. Per una fruibilità delle informazioni è consigliato considerare un difetto gravoso che può portare a pregiudicare l'instabilità dell'elemento; esso viene dichiarato utilizzando le nomenclature all'interno dell'*Allegato B* come testo, o nel caso di piattaforme di gestione più avanzate, come etichetta. Il solo codice non permette di capire le criticità reali in fase di consultazione ma permette di dare solo delle informazioni

apparenti sul danneggiamento, è opportuno effettuare una descrizione dettagliata del difetto riscontrato attraverso una compilazione di un formato testo. La data dell'ultima ispezione è un parametro altrettanto importante in fase di consultazione, ha il compito di far apprendere all'ispettore qual è stato l'ultimo controllo effettuato sull'elemento considerato. Se si hanno dei grandi danneggiamenti strutturali e dall'ultima ispezione sono passati tanti anni, si ha un'alta probabilità di avere delle problematiche amplificate sull'elemento se non sono stati svolti degli interventi di risanamento. Il dato può essere espresso come un formato testo o può essere calendarizzato in una sezione separata nella piattaforma di gestione.

*Prove distruttive e no.* Dopo che l'elemento è stato ispezionato e si sono riscontrate delle problematiche legate alla stabilità strutturale; l'ispettore può decidere di effettuare delle prove distruttive e non successive, atte a determinare le caratteristiche meccaniche degli elementi in previsione di un intervento. Per non appesantire la piattaforma di gestione è opportuno condividere impiegando una stringa URL la scheda delle prove eseguite e, successivamente, la data della prova.

*Interventi precedente.* Terminata la campagna di ispezioni e prove in situ, se è ritenuto necessario, è consigliato effettuare degli interventi di ristrutturazione degli elementi danneggiati o rigenerando gli esistenti o sostituendoli con elementi nuovi. In sede di revisione nelle piattaforme di condivisione è importante condividere la tipologia di intervento e una descrizione sommaria attraverso un formato testo, una foto dell'intervento effettuato impiegando, dei *placeholder* posizionati sul modello con la data dell'ultimo intervento.

*Monitoraggio strutturale.* Il monitoraggio strutturale ha lo scopo di tener monitorato tutti gli aspetti legati al comportamento dell'impalcato e dei successi danneggiamenti. I sensori non vengono installati su ogni singolo elemento ma avviene uno studio preliminare per progettare l'impianto in modo da ottimizzare i dati in entrata e i costi di intervento. Per ogni sensore è necessario condividere la tipologia della tecnologia impiegata attraverso una descrizione di tipo testuale integrata dall'ispettore. Per verificare se il sensore ha dei guasti o funziona regolarmente, è opportuno analizzare lo stato operativo del singolo sistema definendo un'etichetta: Accesso, Spento. Come descritto nei capitoli precedenti ogni sensore ha degli output differenti a seconda dell'informazione desiderata, non tutti i dati sono essenziali per un corretto monitoraggio ma bisogna effettuare, attraverso degli algoritmi, delle pulizie in modo da avere un risultato sensato e che non comprometta il corretto funzionamento della piattaforma. L'ispettore deve definire delle soglie di *alert* tali per cui si possano riscontrare delle anomalie strutturali, infatti, al superamento di questi parametri l'ente gestore deve essere avvisato preventivamente in modo da poter intervenire immediatamente. L'ispettore deve impostare i seguenti parametri:

- *Valore limite di prestazione*, a seconda dello studio strutturale, si deve definire una soglia limite;
- *Valore ultimo superamento limite*, esso descrive l'ultimo valore rilevato in situ che ha superato la soglia di alert;
- *Data ultimo superamento limite*;
- *Temperatura ultima superamento limite*, nel caso l'impianto abbia incorporato dei sensori dedicati alla misura della temperatura esterna, è necessario riportare questo

valore, infatti, la maggior parte dei sensori è dipendente dalla temperatura e un valore di alert può essere superato se le condizioni al contorno lo favoriscono (esempio: dilatazione dei giunti strutturali sono fortemente influenzati dalla temperatura);

- *Valore massimo superamento limite*, è il valore massimo riscontrato in tutta la storia del monitoraggio;
- *Data massimo superamento limite*; è molto importante confrontare le date con i due valori di alert, infatti, se ricade sullo stesso periodo stagionale e con temperature pressoché simili il valore di allarme è trascurabile data la continuità del dato nel tempo;
- *Soglia di alert frequenza eventi*, questo valore, imposto dall'ispettore indica il numero di alert che possono susseguirsi in un determinato periodo di tempo;
- *Conteggio alert annuo*;
- *Conteggio alert totale*.

Tutti questi parametri, tranne i valori delle date, possono essere rappresentati con valori numerici integrati direttamente dalla sensoristica all'interno delle piattaforme di gestione.

### 3.2. ELEMENTI NON STRUTTURALI

Gli elementi non strutturali vengono studiati reperendo delle informazioni molto meno dettagliate. Nella maggior parte dei casi la loro non fruibilità non influenza la capacità portante dell'opera, ma un loro danneggiamento, può portare a un incremento del deterioramento degli elementi strutturali portanti (esempio: sistema di convogliamento acque danneggiato compromette il normale funzionamento degli elementi strutturali creando dei danni, inizialmente estetici e successivamente più importanti come distacco del copriferro e corrosione delle armature).

*Tipologia di elemento*. Gli elementi non strutturali riportati all'interno dell'Allegato B possono essere interrogati impiegando un'etichetta: Pavimentazione, Cordolo, Convogliamento delle acque, Marciapiede, Palo di illuminazione, Sottoservizio.

*URL foto*. Per una visualizzazione e una comprensione ottimale, vengono impiegati dei *placeholder* riferiti a dei link esterni.

*Scheda di difettosità – Allegato B*. Come per gli elementi strutturali, la scheda di difettosità viene implementata con una stringa URL all'interno della piattaforma di gestione.

*Marciapiede*. La presenza del marciapiede sormontabile non è obbligatoria nei ponti. Se non è presente è opportuno descrivere la tipologia di guardavia (guardrail) definendo la tipologia con un'etichetta: Muratura, Ringhiera, Metallico, Altro; lo stato di conservazione definendo se è danneggiato oppure no attraverso un'etichetta o un booleano. L'uso dei *placeholder* è importante per catalogare un danneggiamento. Nel caso di marciapiede è necessario tener conto di tre parametri:

- *Presenza di pavimentazione*: attraverso un'etichetta si può definire: Assente, Buona pavimentazione, Cattiva pavimentazione. Nel caso di danneggiamento della stessa è possibile condividere attraverso un *placeholder* l'URL della foto descrittiva. Non tutti i

marciapiedi sono adibiti alla normale circolazione, quindi, è consigliato definire con un'etichetta o un booleano la presenza o l'assenza di marciapiede sormontabile;

- *Guardavia*: il guardrail deve essere descritto a seconda della tipologia adottata descrivendolo con un'etichetta: Muratura, Ringhiera, Metallico, altro; definendo lo stato di conservazione dichiarando un possibile danneggiamento rilevante attraverso un'etichetta o un booleano e, infine, rappresentando con dei *placeholder* le fotografie;
- *Parapetto*: esso è un elemento di protezione impiegato per la sicurezza di persone in casi di urti o cadute nel vuoto. Come per il guardrail è necessario definire la tipologia attraverso un'etichetta: Muratura, Ringhiera, Metallico, altro. La condizione attuale dell'elemento è importante per definire il danneggiamento e può essere descritta attraverso un'etichetta o un booleano. Se esso presenta dei danneggiamenti non trascurabile è opportuno redigere delle fotografie ed implementarle utilizzando dei *placeholder*.





- Batenko, Anatoly, Alexander Grakovski, Igor Kabashkin, Elmars Petersons, and Yuri Sikerzhicki. 2011. "Weight-in-Motion (WIM) Measurements by Fiber Optic Sensor: Problems and Solutions." *Transport and Telecommunication* 12(4):27–33.
- Candigliota, Elena, Paolo Clemente, and Francesco Immordino. n.d. "Recenti Sviluppi Nel Monitoraggio Statico e Dinamico Di Ponti e Viadotti." 1–6.
- Chellini, G., F. V Lippi, L. Nardini, and W. I. Salvatore. 2001. "Analisi Modale Operativa Di Ponti : Alcune Applicazioni."
- Consiglio Superiore dei lavori Pubblici. 2020a. "Linee Guida per La Classificazione Del Rischio, La Valutazione Della Sicurezza Ed Il Monitoraggio Dei Ponti Esistenti."
- Consiglio Superiore dei lavori Pubblici. 2020b. "Schede Difettologiche." 0–131.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. 2020a. "Schede Di Censimento Ponti Di Livello 0." 0–11.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. 2020b. "Schede Di Ispezione Ponti Di Livello 1 – Fenomeni Di Frana e Fenomeni Idraulici." 1–11.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. 2020c. "Schede Di Valutazione Dei Difetti." 0–24.
- Cross, E. J., K. Y. Koo, J. M. W. Brownjohn, and K. Worden. 2010. "Long-Term Monitoring and Data Analysis of the Tamar Bridge." *Proceedings of ISMA 2010 - International Conference on Noise and Vibration Engineering, Including USD 2010* 35:1345–57.
- Delgado, Juan M. Davil., Liam J. Butler, Niamh Gibbons, Ioannis Brilakis, Mohammed Z. E. B. Elshafie, and Campbell Middleton. 2017. "Management of Structural Monitoring Data of Bridges Using BIM." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering* 170(3):204–18. doi: 10.1680/jbren.16.00013.
- Dong, Yongtao, Ruiqiang Song, and H. Liu. 2010. "Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection-Synthesis of Knowledge and Technology." *Final Report. Fairbanks* (December):1–182.
- Dumoulin, J., and R. Averty. 2012. "Development of an Infrared System Coupled with a Weather Station for Real Time Atmospheric Corrections Using GPU Computing: Application to Bridge Monitoring." doi: 10.21611/qirt.2012.204.
- Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. 2018. "Decreto Genova 19/11/2018." 0–269.
- Gentile, Carmelo. 2021. "Lo Stato Della Ricerca Sulla Valutazione Del Rischio e La Verifica Della Sicurezza Di Ponti e Viadotti - Il Monitoraggio Dei Ponti e Aspetti Generali."
- Inaudi, Daniele. 2000. "Application of Fiber Optic Sensors to Structural Monitoring." *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection* 4763:459–72. doi: 10.1016/b978-008043020-1/50031-4.
- Mannella, Ing Paolo. 2021. "Lo Stato Della Ricerca Sulla Valutazione Del Rischio e La Verifica Della Sicurezza Dei Ponti e Dei Viadotti - Monitoraggio Dei Ponti e Aspetti Applicativi."
- Manuel, Juan, Davila Delgado, D. Ph, Liam J. Butler, D. Ph, Mohammed Z. E. B. Elshafie, and D. Ph.

n.d. "Structural Performance Monitoring Using a Dynamic Data- Driven BIM Environment  
Corresponding Author : Manuel.Daviladelgado@uwe.Ac.Uk Visiting Lecturer at Qatar  
University."

Ministero dell'Interno. 1967. "Circolare N° 6736/61/Al Del 19.07.1967." 0–10.

Ministero dell'Interno. 1980. "Circolare Ministeriale LL PP 220977 Del 02/08/1980." 0–7.

Ministero dell'Interno. 1991. "Circolare Ministeriale LL PP 34233 25/02/1991." 0–15.

Mita, Akira. 1999. "Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures." *International Journal on Structural Health Monitoring* 1–12.

Moss, Roxanne, and Stuart Matthews. 1995. "IN-SERVICE STRUCTURAL MONITORING. A STATE OF THE ART REVIEW." *The Structural Engineer* 73.

Palamà, Melani. 2021. "Monitoraggio Strutturale Attivo Su Un Viadotto Autofiori Tra Sanremo - Imperia: Dalle Simulazioni Numeriche Su Modello FEM Alla Scelta Dei Possibili Sensori Utilizzati."

Pietro Palumbo. 2021. "Monitoraggio Strutturale Ed Identificazione Dinamica : Il Caso Studio Del Ponte Bologna a Torino."

Panah, Reihane Shafie, and Mahdi Kioumarsi. 2021. "Application of Building Information Modelling (BIM) in the Health Monitoring and Maintenance Process: A Systematic Review." *Sensors (Switzerland)* 21(3):1–26. doi: 10.3390/s21030837.

Prof.Ing. Claudio Modena. 2019. "Metodologie e Tecniche Di Monitoraggio e Di Caratterizzazione Strutturale Di Ponti."

Provincia autonoma di Trento. 2013a. "Esecuzione Ispezione Principale Dei Ponti." 1–16.

Provincia autonoma di Trento. 2013b. "Guida Generale Sistema Ispettivo." 1–90.

Provincia autonoma di Trento. 2013c. "Norme Generali per l'esecuzione Di Prove Di Caratterizzazione Sperimentale Di Ponti Esistenti." 1–29.

Spallotta, Mattia. 2021. "Utilizzo Dei Sistemi SHM Alla Luce Delle Linee Guide Sui Ponti." Università degli studi di Padova.

Worden, Keith, Charles R. Farrar, Graeme Manson, and Gyuhae Park. 2007. "The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 463(2082):1639–64. doi: 10.1098/rspa.2007.1834.



Figura 1 - Flusso Metodologico .....	7
Figura 2 - Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi .....	21
Figura 3 - Rappresentazione dei valori rappresentanti l'Allegato B - scheda di valutazione dei difetti .....	25
Figura 4 - Frequenza minima delle ispezioni ordinarie.....	28
Figura 5 - Schematizzazione sistema di monitoraggio.....	36
Figura 6 - Pendolo diritto e pendolo rovescio .....	41
Figura 7 - Inclinometro fisso da foro .....	43
Figura 8 - Analisi di depurazione del dato statico.....	44
Figura 9 - Estensimetro a corda vibrante .....	44
Figura 10 - Trasduttore lineare di spostamento .....	45
Figura 11 - Celle di carico .....	46
Figura 12 - Impiego con galleggiante.....	47
Figura 13 - Impiego con collare scorrevole magnetico.....	48
Figura 14 – Impiego con monitoraggio sonar .....	49
Figura 15 - Funzionamento asta mobile temporizzata .....	50
Figura 16 - Sensore di temperatura ed umidità.....	52
Figura 17 - Configurazione rosette estensimetriche .....	53
Figura 18 - Processi rielaborazione del dato accelerometri .....	56
Figura 19 - Esempio posizionamento tecnologia TInRAR .....	60
Figura 20 - Geometria di acquisizione del sistema satellitare interferometrico SAR .....	61
Figura 21 - Prospettiva ponte sul Brenta .....	65
Figura 22 - Modellazione informativa del Ponte anni 1961-1962 .....	66
Figura 23 - Modellazione informativa dello stato attuale .....	66
Figura 24 - Moduli interoperabili Midas CIM.....	67
Figura 25 - Rispettivamente Point Libraries, Curve Libraries e Assembly Unit .....	68
Figura 26 - Progressive impalcato Nord cemento armato.....	70
Figura 27 - Spalle e pile impalcato Nord.....	71
Figura 28 - Elemento strutturale base spalla lato Padova .....	71
Figura 29 - Procedura assegnazione singoli elementi Point Libraries.....	72
Figura 30 - Rispettivamente Spalla Padova e Venezia impalcato Nord .....	73
Figura 31 - Assembly Unit Pila Nord direzione Padova.....	73
Figura 32 - Rispettivamente Pila Venezia e Padova impalcato Nord .....	73
Figura 33 - Struttura impalcato calcestruzzo armato lato Nord .....	74
Figura 34 - Piani di riferimento per la sovrapposizione sella Gerber.....	75
Figura 35 - Sezione anima trave calcestruzzo armato .....	75
Figura 36 - Esempio cambio di sezione nell'estrusione delle sezioni nelle Curve Libraries.....	76
Figura 37 - Rispettivamente Curve Libraries trave e soletta.....	76
Figura 38 - Assembly unit trave intermedia impalcato Nord cemento armato .....	77

Figura 39 - Assegnazione Assembly Unit trave intermedia impalcato Nord cemento armato.....	77
Figura 40 - Impalcato lato Venezia, Padova, intermedio calcestruzzo armato Nord.....	78
Figura 41 - Impalcato a cassone ponte Nord.....	78
Figura 42 - Curve Libraries campata intermedia acciaio Nord.....	79
Figura 43 - Controvento a V rovescia .....	79
Figura 44 - Creazioni bullonature controvento a V rovescio .....	80
Figura 45 - Assembly Unit impalcato intermedio in acciaio ponte Nord .....	80
Figura 46 - Assegnazione impalcato Padova, Venezia ed intermedio struttura in Acciaio ponte Nord .....	81
Figura 47 - Dettaglio costruttivo ancoraggio e dispositivo di appoggio ponte Nord .....	82
Figura 48 - Assembly Unit impalcato di appoggio acciaio ponte Nord .....	82
Figura 49 - Tracciato impalcato acciaio ponte Nord.....	83
Figura 50 - Barriera di sicurezza e marciapiede ponte Nord .....	83
Figura 51 - Assembly Unit elementi non strutturali .....	84
Figura 52 - Impalcato Nord.....	87
Figura 53 - Spalle e pile impalcato Sud.....	88
Figura 54 - Impalcato calcestruzzo armato ponte Sud .....	88
Figura 55 - Impalcato in acciaio ponte Sud.....	89
Figura 56 - Impalcato Sud.....	89
Figura 57 - Modello globale del ponte .....	90
Figura 58 - Gerarchia strutturale .....	91
Figura 59 - Parametri di esportazione geometrici .IFC .....	92
Figura 60 - Selezione impalcato Nord impiegato il software Open Source BIMVision .....	93
Figura 61 - Errori riscontrati modificando alcuni parametri di esportazione .....	94
Figura 62 - Combinazione dei parametri di esportazione in formato .IFC.....	94
Figura 63 - Flow-chart sui primi due livelli delle linee guida.....	96
Figura 64 - Flowchart livello 3,4 e 5.....	97
Figura 65 - Dati di primo livello.....	98
Figura 66 - Dati di secondo livello.....	100
Figura 67 - Dati di terzo e quarto livello .....	104