

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria
corso di Laurea in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Monitoraggio di strutture basato su misure
di deformazione e inclinazione**



Relatori:

Prof. Maurizio Taliano

Dott. Ing. Matteo Guiglia

Candidato:

Serafino Palumbo

a.a. 2017/2018

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	STRUCTURAL HEALTH MONITORING.....	5
2.1	Componenti di un sistema di monitoraggio.....	7
2.2	Requisiti.....	8
2.3	Ispezione strutturale.....	10
2.3.1	Ispezione visiva.....	10
2.3.2	Ispezione approfondita.....	12
2.3.3	Prove non distruttive (NDE).....	12
2.3.3.1	Test radiografici.....	12
2.3.3.2	Emissioni acustiche.....	13
3	STRUMENTI DI MISURA.....	15
3.1	Trasduttori elettrici di spostamento collegati a centraline di acquisizione dati.....	16
3.2	Stazioni topografiche robotizzate servo-assistite di precisione.....	17
3.3	Trasformatori lineari differenziali LVDT.....	18
3.4	Estensimetri.....	19
3.5	Accelerometri.....	20
3.6	Inclinometri.....	21
3.7	Misure di temperatura e umidità.....	22
4	MODELLI TEORICI.....	25

4.1	Ricostruzione dell'andamento della deformata tramite un polinomio	25
4.1.1	Valutazione abbassamento con sensori di spostamento e inclinometri.....	25
4.1.2	Valutazione dell'abbassamento usando misure di deformazione e rotazione....	27
4.1.3	Applicazioni	31
4.1.3.1	Valutazione analitica dell'abbassamento basandosi su curvature e inclinazioni prive di errore (modello FEM)	31
4.1.3.2	Valutazione dell'abbassamento basandosi su misure sperimentali effettuate in una prova di laboratorio	39
4.2	Valutazione della deformata dovuta alla flessione e al taglio tramite modelli semplificati	48
4.2.1	Applicazioni	54
5	CASO STUDIO DELLA METODOLOGIA CON ELEMENTI LOW-COST.....	61
5.1	Sysdev SHBOX	61
5.1.1	I nodi multi-sensore.....	62
5.1.2	Infrastruttura di rete.....	65
5.1.3	La piattaforma software	67
5.2	Protocollo LoRaWAN	70
5.3	Esempio di sistema di monitoraggio permanente su ponti e viadotti	72
5.4	Metodo polinomiale con errori sulle misure di inclinazione e deformazione	74
6	CONCLUSIONI.....	97
	INDICE DELLE FIGURE	99
	INDICE DELLE TABELLE	105

APPENDICE A.....	109
BIBLIOGRAFIA.....	113
RINGRAZIAMENTI.....	117

1 INTRODUZIONE

Durante il suo periodo operativo, un'infrastruttura civile dovrebbe sempre soddisfare i requisiti di sicurezza per cui è stata progettata; però essa si degrada sia a causa dell'invecchiamento dei materiali sia a causa dei fenomeni naturali che possono interessarla, come terremoti, venti forti nonché a causa di altre azioni eccezionali. Negli ultimi decenni il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring (SHM)), è diventato di fondamentale importanza per lo studio delle strutture grazie all'ausilio di tecnologie sempre più avanzate per quello che riguarda i sensori, la loro rete, l'acquisizione e comunicazione dei dati, la loro elaborazione e gestione. Un sistema di monitoraggio presenta tre componenti fondamentali: un sistema di sensori; un sistema di elaborazione dei dati, comprendente l'acquisizione, trasmissione e archiviazione dei dati; e, infine, un sistema di valutazione della salute della struttura, comprendente tecniche di analisi ed algoritmi che consentono di delineare valutazioni specifiche sullo stato della struttura sulla base dei dati misurati.

Il monitoraggio delle strutture mira, pertanto, a capire le attuali condizioni delle strutture e la presenza di eventuali danni e del loro sviluppo nel tempo. Per un periodo sufficientemente lungo possono essere misurati non solo gli effetti strutturali come rotazioni, spostamenti, apertura delle fessure, ma anche le azioni subite dalla costruzione nel tempo, ad esempio vento, terremoti, cedimenti del terreno, ecc.

Allo stesso tempo, il monitoraggio permette di approfondire la conoscenza della struttura e quindi di ottimizzare la pianificazione degli interventi di manutenzione sia ordinaria che straordinaria, permettendo al proprietario dell'opera di intervenire in maniera tempestiva. In questo modo si evita la demolizione e la ricostruzione dell'opera, che oltre ad essere più onerosa rispetto alla ristrutturazione, porta con sé altre problematiche, ad esempio di tipo ambientale o se si tratta di un'opera infrastrutturale può creare anche problemi al traffico nella zona interessata.

Il monitoraggio può consentire il riconoscimento di processi incrementali nel tempo e quindi fornire informazioni utili per lo studio e il restauro di antiche costruzioni. I risultati del monitoraggio devono essere generalmente usati in combinazione con un modello numerico schematizzante il comportamento della struttura, purché siano misurati non solo i parametri associati alla risposta (deformazioni, spostamenti, rotazioni ecc.), ma anche le azioni caratterizzanti (effetti termici ambientali, movimenti del suolo, ecc.).

Il panorama italiano presenta molte strutture che possono essere classificate come funzionalmente inadeguate sia per la loro età sia perché presentano delle deficienze strutturali importanti, basti pensare che la maggior parte delle opere infrastrutturali presenti sul nostro territorio hanno superato la loro vita utile di progetto e per questo c'è la necessità di intervenire in maniera efficace sia in termini strutturali che a livello economico. Il monitoraggio strutturale si pone come una delle soluzioni più adeguate ad intervenire in breve tempo con interventi di manutenzione straordinaria e ordinaria mirati e di controllare in maniera capillare la struttura per identificare e localizzare il danno. Allo stesso modo è possibile monitorare permanentemente le strutture, sin da quando vengono costruite, con l'obiettivo di riconoscere nel più breve tempo possibile i rischi o estendere la vita utile della struttura.

Oggi abbiamo una grossa varietà di strumenti di misura che ci permettono di misurare tutti i movimenti della struttura, oltre ad altri parametri che, comunque, influenzano il comportamento stesso dell'opera, come la temperatura, l'umidità, ecc. Questi strumenti presentano caratteristiche e costi fra i più disparati.

Ai sensori devono essere abbinati gli appositi software, attraverso i quali riusciamo a mettere insieme ed interpretare in modo veloce la grossa mole di dati registrati e caratterizzare gli eventuali danni, prevedendone lo sviluppo. Inoltre, in letteratura sono presenti dei metodi dove si vanno a sfruttare i sensori presenti negli smartphone per andare a studiare le deformazioni subite dalle opere. Quindi è possibile notare come si può passare da strumenti sofisticati e molto costosi a strumenti poco costosi e utilizzati quotidianamente; ciò dà la possibilità di usare molti più strumenti su un'opera, fornendo risultati più accurati ad un costo notevolmente inferiore.

L'obiettivo di questa tesi è quello di studiare i vari modelli sviluppati per interpretare i valori ricavati da misure di deformazione locale ricavate tramite sensori posizionati sulla struttura e verificarne la loro validità confrontandoli con i valori ricavati sul campo. In particolare ci si è soffermati su un metodo che attraverso un polinomio di grado $n-1$, dove n è il numero di condizioni al contorno, ci permette di ricavare l'inflessione di una trave. Attraverso degli inclinometri e degli estensimetri posizionati in alcuni punti della struttura erano note le rotazioni e le curvature, che vengono utilizzate come condizioni al contorno e ci permettono di ricavare i coefficienti incogniti del polinomio scelto. Una volta ricavati i coefficienti è stato possibile ricavare punto per punto il valore di abbassamento e diagrammarlo, andando a confrontarlo con i valori di abbassamento dati dai sensori in quel punto e quantificarne l'errore. Inoltre, si è andata a studiare la posizione ottimale dei sensori affinché la risposta sia compatibile con i valori misurati in alcuni punti. Questo ha permesso di ridurre al minimo l'errore tra il valore

calcolato in un punto con il polinomio e il valore misurato dallo strumento posizionato proprio nello stesso punto.

Grazie a queste tecniche è possibile scoprire e valutare un danno alla struttura, che tra gli altri può essere lo sviluppo di cricche da fatica, corrosione dei ferri di armatura, giunti di dilatazione malfunzionanti oppure degrado di connessioni strutturali. I diversi gradi di pericolosità dipendono dalla natura del danno, dalla sua posizione, dalla sua estensione e da quanto tempo il danno si è sviluppato. Quindi si nota quanto sia importante identificare il danno in tempi brevi e reagire di conseguenza sia per le perdite di vite umane che possono esserci sia da un punto di vista dell'impatto economico che può avere la demolizione e ricostruzione dell'opera.

Infine, viene analizzato come caso studio l'impiego di strumenti multi-sensori sviluppati da Sysdev, una start-up del Politecnico di Torino, che permettono di valutare più parametri nello stesso punto. Questi sensori hanno diversi vantaggi rispetto ai sistemi di monitoraggio strutturale tradizionali, quali basso costo, semplicità di montaggio, elevata durata della batteria ecc. Grazie a queste caratteristiche è possibile monitorare un maggior numero di strutture con una perdita di precisione relativamente bassa.

2 STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Il monitoraggio strutturale, altrimenti detto Structural Health Monitoring (SHM), è uno dei più importanti strumenti per assicurare l'integrità e la sicurezza di una struttura. Esso consiste nell'implementare un sistema per rilevare i danni nelle strutture, sfruttando delle tecnologie di rilevamento che permettono di acquisire, registrare e analizzare i dati in tempo reale. Quanto detto permette di monitorare la struttura e rilevare i danni nella loro fase più precoce e, quindi, è possibile sviluppare strategie di manutenzioni efficaci e fornire una previsione accurata della vita rimanente dell'opera.

Un sistema di monitoraggio si compone di vari stadi di identificazione del danno, ad esempio, se il danno è presente, in quale posizione geometrica si trova, il tipo di danno, la sua pericolosità, ecc. Ad ogni diverso livello corrisponde un differente equipaggiamento del sistema, tipo e numero di sensori, il tipo di algoritmo usato per gestire i dati e i parametri utilizzati per creare un modello matematico rispondente il più possibile alla realtà.

In termini di scale di grandezza, tutti i danni iniziano a livello del materiale; tale danno viene indicato come un difetto e tutti i materiali ne sono affetti in una certa misura. Sotto determinati sistemi di carico questi possono crescere e coalizzarsi, portando a danni su più grande scala e quindi che interessano tutto il sistema. Il termine danno non implica necessariamente una perdita totale di funzionalità, ma solo che il sistema non funziona in modo ottimale. Man mano che il danno aumenta, raggiungerà un punto in cui la struttura non è più utilizzabile e quindi si deve intervenire nel più breve tempo possibile.

Se si ragiona in termini di scale temporali, il danno può svilupparsi in periodi di tempo che possono essere di breve o lunga durata, come l'accumulo di danni derivanti da fatica o corrosione.

Un'efficace sistema di monitoraggio ci permette di capire il tipo di danno e la sua evoluzione nel tempo e, quindi, intervenire nel più breve tempo possibile ed evitare di arrivare a situazioni di pericolo per l'utenza. Questo porta ad un notevole risparmio economico, perché demolire e ricostruire un'opera è notevolmente più dispendioso di predisporre un adeguato programma di manutenzione che interviene miratamente sul danno. Inoltre, se parliamo di un'opera infrastrutturale, la demolizione porta a problemi sia per il traffico, che dovrà essere canalizzato lungo percorsi alternativi, che per l'ambiente, dovuto ai materiali di scarto che dovranno essere smaltiti, ma anche perché la nuova opera dovrà essere inserita nell'ambiente circostante nel modo più armonico possibile.

L'applicazione di un sistema di monitoraggio su una struttura, comporta la sua osservazione nel tempo utilizzando misure periodicamente distanziate, l'estrazione da queste di quelle caratteristiche sensibili ai danni e l'analisi statistica di quest'ultime per determinarne lo stato di salute. Un monitoraggio a lungo termine fornisce dei dati atti a capire la capacità di una struttura di continuare a svolgere la sua funzione, tenendo conto anche di alcune variabili come l'invecchiamento naturale dei materiali dovuto all'ambiente circostante.

Allo stesso modo, possiamo sfruttare un sistema di monitoraggio dopo l'avvento di eventi estremi, come terremoti o esplosioni, per accertarci in modo rapido delle condizioni della struttura e su quali e quanti danni posso aver fatto. Questo screening, che può essere fatto in tempo quasi reale, ci dà informazioni dettagliate sulle prestazioni del sistema dopo l'evento e si possono prendere le decisioni di conseguenza.

Il notevole interesse sviluppato, negli ultimi decenni, verso lo Structural Health Monitoring da parte sia degli scienziati che degli ingegneri, ma anche da parte dei proprietari di edifici di interesse storico e di opere infrastrutturali importanti, spiega come questo sistema permetta di tutelare vite umane ma, allo stesso tempo, di garantire un basso impatto economico. Ad esempio, per l'ente che controlla le strade di una Paese è di fondamentale importanza conoscere lo stato di salute di tutte le opere infrastrutturali presenti sul territorio nazionale, in quanto ciò permette, innanzitutto, di predisporre una gerarchia di intervento a seconda della gravità del danno, ma anche di evitare di arrivare a situazioni dove la manutenzione non è più sufficiente, ma l'opera deve essere demolita e ricostruita; nonché permette di evitare un crollo improvviso con le conseguenti perdite di vite umane.

Un'altra caratteristica importante è la ricerca di una configurazione ottimale dei sensori per ottenere informazioni complete sulla salute strutturale. Di conseguenza si riduce al minimo il numero di sensori, si riduce l'investimento per gli hardware, si migliora l'affidabilità e si crea un sistema più robusto.

Pertanto, il posizionamento ottimale del sensore è diventato un problema chiave nel monitoraggio strutturale, soprattutto nei ponti di grande luce dove è necessario un numero elevato di sensori per descrivere completamente il problema. Questa tematica copre diversi campi di ricerca, come la tecnologia dei sensori, le dinamiche strutturali, la tecnologia dell'informazione, la teoria dell'ottimizzazione e altri. Generalmente il posizionamento ottimale dei sensori è visto come un problema di ottimizzazione combinatoria che seleziona le posizioni dei sensori da un determinato insieme di candidati per acquisire il più grande numero

di informazioni per determinare la salute strutturale di un'opera. In letteratura è presente una grande quantità di metodi che ci permette di avere la configurazione ottimale per avere il maggior numero di informazioni possibili.

Queste tecniche possono essere divise in due categorie, cioè approcci iterativi e algoritmi di ottimizzazione globale. Nei metodi iterativi, il calcolo delle posizioni ottimali dei sensori è un processo iterativo che spesso ottiene l'ottimizzazione locale piuttosto che quella globale. Date le carenze dei metodi iterativi, negli ultimi anni, si sono sviluppati alcuni algoritmi intelligenti per determinare lo schema ottimale dei sensori, che tuttavia richiedono ancora dei miglioramenti.

2.1 Componenti di un sistema di monitoraggio

Un sistema di monitoraggio è formato dai sensori, che vengono montati sulla struttura, un sistema di acquisizione e raccolta dati e un software che permette di gestire ed elaborare questi dati in modo adeguato a fornire una risposta, che sia il più chiara possibile per l'utilizzatore.

I sensori sono dei dispositivi che vengono installati sulla struttura e sono in grado di misurare i movimenti della struttura, come rotazioni, spostamenti assoluti e relativi, accelerazioni. Questi dispositivi presentano caratteristiche diverse sia per il campo di applicabilità sia per la precisione delle misure da essi fornite, nonché hanno costi differenti a seconda di quanto sono sofisticati. Alcuni tipi di sensori saranno approfonditi nella sezione 3.

Inoltre ci sono strumenti in grado di misurare parametri ambientali come la temperatura interna o esterna, l'umidità e la forza o velocità del vento, che influenzano i risultati finali. Per cui attraverso questi strumenti è possibile eliminare il cosiddetto rumore, cioè quegli spostamenti dovuti al variare della temperatura o dell'umidità, che non portano danni alla struttura.

I sensori sono collegati a un sistema di acquisizione dati attraverso i cavi elettrici o via wireless. Il sistema di acquisizione dati permette di memorizzare la grande mole di dati provenienti dai sensori in modo automatico, secondo un intervallo di tempo preimpostato dall'operatore. Quest'ultimo è collegato ad un modem GSM/GPRS che permette la trasmissione dei dati ad un dispositivo remoto, ad esempio, un PC in un laboratorio, per essere analizzati e interpretati.

Infine abbiamo un software di gestione dei dati, che elabora tutti i dati arrivati dai sensori nel tempo e ne fornisce una risposta facile da analizzare per l'utilizzatore. Alcuni software più sofisticati hanno, in base al tipo di struttura, delle soglie che questa non deve superare e

segnalano in automatico quando queste soglie sono state superate. I risultati finali forniti dai software possono essere visualizzati in forma tabellare o in forma grafica.

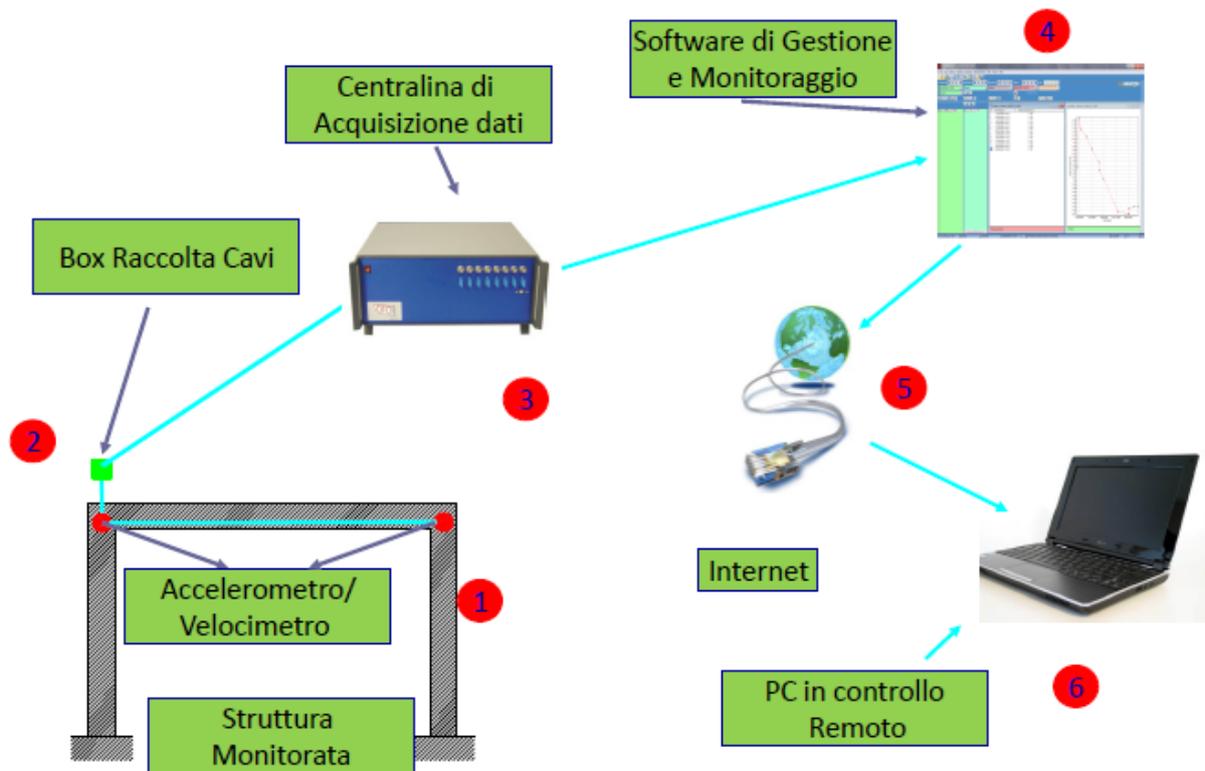


Figura 2.1: Architettura di un sistema di monitoraggio

2.2 Requisiti

I tecnici hanno la necessità di acquisire informazioni in modo affidabile, ma hanno anche l'esigenza di dover interpretare i risultati in modo adeguato. *Bilda* in [3] afferma che per garantire la corretta interpretazione dei dati, è necessario prendere in considerazione una serie di requisiti:

1. Prima dell'esecuzione di un programma di monitoraggio è necessario eseguire indagini storiche e indagini geometriche e morfologiche dell'opera per avere una caratterizzazione dettagliata dell'edificio e di conseguenza una migliore interpretazione del risultato del monitoraggio. Pertanto devono essere eseguiti dei test non distruttivi volti a determinare la morfologia interna degli elementi strutturali e le proprietà meccaniche dei materiali. Inoltre bisogna analizzare con cura le fondazioni, in quanto possono influenzare significativamente i movimenti e le deformazioni da monitorare.

2. Dovrebbero essere misurate delle grandezze specifiche e effettivamente monitorabili, adeguatamente correlati ai fenomeni fisici da analizzare. Ogni fenomeno richiede una diversa strategia di monitoraggio.
3. Le azioni che interessano la costruzione devono essere monitorate in combinazione con la sua risposta strutturale. Ciò richiede il monitoraggio dei parametri ambientali climatici (temperatura e umidità), i parametri del vento (velocità e direzione), il movimento sismici del suolo, ecc. Lo scopo principale è quello di correlare le cause, rappresentate dalle azioni, agli effetti, rappresentati dalla risposta strutturale. Inoltre è possibile estrarre l'effetto variabile di una qualsiasi azione sulla struttura solo se le azioni stesse sono state misurate e analizzate con cura.
4. Anche se le azioni climatiche non sono l'obiettivo principale, queste devono essere determinate dal momento che il loro impatto sulla struttura è molto elevato e può alterare o addirittura mascherare le deformazioni causate da altri effetti, soprattutto quelli legati al danno a lungo termine. È, pertanto, necessario caratterizzare le azioni climatiche per determinare e annullare la componente climatica nell'output del monitoraggio. Il monitoraggio deve essere progettato per consentire una chiara distinzione tra le componenti reversibili o cicliche dei parametri misurati e le componenti irreversibili e cumulative.
5. Deve essere disponibile un modello numerico accurato per interpretare i risultati e correlare le cause identificate ai loro effetti, alla luce di ipotesi sulla configurazione e le condizioni della struttura. Caratterizzare l'azione nel dominio del tempo permetterà in seguito la sua simulazione numerica e il confronto tra quest'ultima e la risposta effettiva misurata. Quindi si andrà a modificare adeguatamente le ipotesi fino a raggiungere una coincidenza soddisfacente tra previsioni numeriche e misurazioni.
6. Il monitoraggio deve essere effettuato per un periodo sufficientemente lungo da coprire l'intera durata delle azioni cicliche. Poiché si devono considerare le variazioni annuali di temperatura, il periodo minimo accettabile è un anno completo. Però, si può dire, che il periodo minimo più ragionevole sono 4 anni, poiché consente la conferma delle tendenze e l'individuazione di misure anomale prodotte da azioni straordinarie o alterazioni al sistema di monitoraggio stesso.
7. Con lo scopo di fornire misure significative riguardo all'obiettivo del monitoraggio, è necessario selezionare i punti critici della struttura. In questo viene in aiuto la

simulazione numerica fatta in precedenza che ci permette di determinare la configurazione ottimale dei sensori. Normalmente, i punti più indicati per installare i sensori saranno quelli che mostrano uno spostamento abbastanza grande o massimo.

8. La natura globale della risposta strutturale deve essere presa in considerazione durante la progettazione della strategia di monitoraggio o nell'interpretazione dei risultati. I punti di monitoraggio non devono essere scelti sulla base di considerazioni locali, ma secondo una progettazione che coinvolge parti strutturali significative o addirittura l'intera struttura.
9. Il sistema di monitoraggio deve essere pensato per consentire la misurazione ridondante degli effetti correlati, consentendo di interpretare i risultati in modo più coerente e solido. Ad esempio, gli spostamenti o le rotazioni di una facciata possono essere misurati contemporaneamente con le relative fessurazioni presenti alla giunzione tra la facciata stessa e le altre pareti.

2.3 Ispezione strutturale

Prima di poter installare il sistema di monitoraggio è necessario scoprire le condizioni dell'opera che si deve studiare. Questo può essere fatto con varie tecniche più o meno invasive prima di procedere alla progettazione e messa in opera del sistema di monitoraggio. Questi aspetti sono analizzati in maniera completa e approfondita anche dalla *International Federation for Structural Concrete (fib)* in [14].

2.3.1 Ispezione visiva

L'ispezione visiva è il primo passo necessario per valutare le condizioni delle strutture. Attraverso di essa si dovrebbe ottenere un'impressione generale su tutti i sintomi di deterioramento e l'identificazione delle fonti reali o potenziali di danni. Sull'ispezione visiva si basano tutti gli step successivi.

Per una corretta ispezione è necessario essere in possesso di una dettagliata descrizione dell'opera, ma soprattutto di informazioni sulla storia della costruzione. Ciò non vuol dire conoscere solo il periodo in cui è stata costruita e i materiali utilizzati, ma bisogna cercare tutte le modifiche che possono essere state fatte durante la vita della struttura.

Durante l'ispezione visiva bisogna fare particolarmente attenzione a una serie di fattori:

- Verifica delle informazioni raccolte durante la fase di pianificazione;
- Vecchi rivestimenti o protezione;
- L'aspetto della superficie del calcestruzzo;
- Differenze di colore sulla superficie del calcestruzzo;
- Presenza di fratture, il loro aspetto e schema;
- Deterioramento superficiale del calcestruzzo;
- Deterioramento del calcestruzzo stesso;
- Barre di armatura esposte;
- Deformazioni della struttura;
- Presenza di umidità o acqua, perdite, ecc.;
- Presenza di sporco accumulato.

Tutto quello che viene trovato deve essere annotato e tenuto in considerazione per le successive misurazioni.

L'ispezione di routine è ispezione visiva di tutte le parti visibili della struttura. L'obiettivo è quello di ottenere una visione delle condizioni generali di tutte le parti della struttura e rilevare i danni più significativi. Tutte le informazioni prese durante l'ispezione di routine generano una serie di valutazioni delle condizioni, in termini numerici, dei singoli componenti strutturali. Queste valutazioni danno una misura complessiva delle condizioni della struttura considerando la gravità del deterioramento e la distribuzione del danno in ogni componente.

I difetti che si possono trovare nel calcestruzzo sono: fratture, delaminazione, rotture, esposizione delle armature, logoramento e abrasione, danno da collisione e altri. I più comuni sono le fratture e le macchie di ruggine.

Le fratture possono essere viste a occhio nudo, ma conviene sempre un fessurimetro per misurarle e classificarle. Queste sono classificate come capillari, medie o larghe. Le fratture capillare non possono essere misurate con strumenti semplici, mentre possono essere usati per misurare le altre due categorie. Tipicamente le fratture capillari non influenzano la capacità di una struttura, ma vengono comunque annotate nei documenti. Le fratture medie e larghe, invece, devono essere registrate e monitorate, perché possono influenzano la capacità strutturale.

Inoltre, le fratture possono essere raggruppate in due tipi: strutturali e non strutturali. Le prime hanno bisogno di immediate attenzioni, esse possono influenzare la sicurezza dell'opera. Le

seconde sono fratture causate da espansioni termiche o dal ritiro del calcestruzzo. Queste non influenzano la sicurezza dell'opera, però possono portare a dei seri problemi di manutenzione. La lunghezza, la direzione e l'estensione delle fratture devono essere misurate e annotate nei documenti di ispezione.

La delaminazione avviene quando degli strati di calcestruzzo si allontanano dai livelli superiori o dalle barre di armatura. La causa principale è l'espansione o la corrosione delle barre per intrusione di cloruri o sali. Per identificare le zone interessate da questo fenomeno viene usato un martello, colpendo il calcestruzzo e a secondo del suono prodotto si stabilisce l'integrità del calcestruzzo. Se si ha un suono vuoto vuol dire che c'è un problema, però questa tecnica non può essere usata quando abbiamo aree molto vaste. Per queste aree viene usata la tecnica del trascinarsi della catena per valutare l'integrità del calcestruzzo con sufficiente accuratezza, questa risulta essere una tecnica veloce e poco costosa. Oppure vengono usate delle tecniche non distruttive che saranno approfondite nella sezione 2.3.3.

2.3.2 Ispezione approfondita

L'ispezione approfondita viene, di solito, svolta dopo l'ispezione visiva per caratterizzare meglio i difetti trovati. Essa è costituito da un programma di test per le strutture in cemento armato che integri le osservazioni visive attraverso l'ottenimento e la prova di campioni per la resistenza a compressione, test di ioni di cloruro, test per la profondità della carbonatazione, valore del pH ed esame petrografico.

2.3.3 Prove non distruttive (NDE)

2.3.3.1 Test radiografici

Il sistema radiografico consiste nel far passare dei raggi X o gamma attraverso l'oggetto che deve essere testato e crea un'immagine su una pellicola fotosensibile. Come mostrato in **Figura 2.2** al di sopra dell'oggetto viene posizionata la sorgente delle radiazioni e sotto l'oggetto viene posizionata la pellicola fotosensibile. I difetti vengono mostrati sulla pellicola da linee scure o da zone ombrose, comparandole con le aree circostanti di materiale solido.

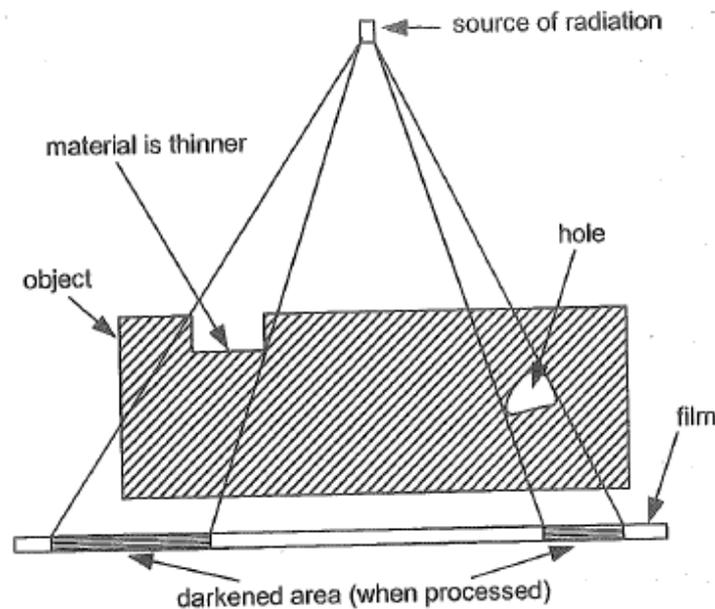


Figura 2.2: Test radiografico

Questo metodo ha il vantaggio di fornire una prova permanente che può essere usata come base per i test successivi. Ciò nonostante, questa prova richiede una buona conoscenza della strumentazione, perché è necessario posizionare la fonte delle radiazioni con il giusto angolo di esposizione, inoltre, richiede di saper interpretare i risultati impressi sulla pellicola.

2.3.3.2 Emissioni acustiche

L'emissione acustica (EA) si riferisce alla generazione di onde elastiche transitorie durante il rapido rilascio di energia da fonti localizzate all'interno del materiale. Le fonti di queste emissioni sono associate a fenomeni di dislocazione accompagnate da deformazioni plastiche e alla propagazione di fratture nella struttura sotto carico.

La tecnica delle emissioni acustiche si basa sulla scoperta e conversione di onde elastiche ad alta frequenza in segnali elettrici. Queste onde ad alta frequenza sono emesse dall'oggetto sotto carico, ad esempio quando si formano i prodotti della corrosione che portano all'espulsione del copriferro che circonda le barre di armatura.

Il vantaggio principale di questa tecnica, rispetto alle altre tecniche non distruttive, è che si riesce a determinare la crescita del difetto. Infatti, la crescita lenta del difetto in materiali duttili produce pochi eventi di emissione acustica, mentre la crescita rapida in materiali fragili produce una grande quantità di alte emissioni acustiche.

Un tipico sistema di monitoraggio delle emissioni acustiche utilizza sensori piezoelettrici incollati tramite adesivo all'oggetto da analizzare. L'output di ogni sensore piezoelettrico viene filtrato per rimuovere ogni rumore di sottofondo che possa influenzare il risultato, e successivamente elaborato da un'adeguata apparecchiatura elettronica.

Quando viene individuata una frattura, attraverso le emissioni acustiche è possibile anche monitorare la sua evoluzione, inoltre, è consigliabile sempre accoppiare al sistema di emissione acustica con altri sistemi di monitoraggio, come gli estensimetri.

Uno dei più grandi difetti di questo sistema è quello di non riuscire a fornire significativi risultati per le sollecitazioni dovute al traffico veicolare se, ad esempio, è montato su ponte.

Oltre ai sensori piezoelettrici esistono anche i trasduttori acustici elettromagnetici, che sfruttano il campo elettromagnetico per ricevere onde di stress ad alta frequenza. Questo tipo di sensori vengono utilizzati principalmente nelle strutture in acciaio, perché possono essere attaccati magneticamente alla struttura.

3 STRUMENTI DI MISURA

La scelta della strumentazione da utilizzare nel monitoraggio è fondamentale influenzata da molti fattori, ad esempio, il tipo di monitoraggio, le condizioni ambientali, la sensibilità della misura richiesta, ma anche, e soprattutto oggi, da condizioni economiche.

Le prestazioni che può fornire una strumentazione di misura come anche la fiducia sui risultati finali dipendono dalle condizioni e dalle modalità in cui lo strumento viene usato e richiedono la conoscenza dei fattori che influenzano la precisione dei dati ricavati. Quindi è di fondamentale importanza che l'utilizzatore dello strumento conosca gli errori della strumentazione e le incertezze connesse ai risultati delle misurazioni.

Il monitoraggio può essere di due tipi:

- **Dinamico**, in cui le misurazioni avvengono in continuo fissando un intervallo predefinito di acquisizione dei dati. Nel caso si abbia a disposizione un software più sofisticato, si può far partire la misurazione al superamento di una soglia preimpostata.
- **Statico**, in cui le misurazioni vengono fatte manualmente da un addetto, che controlla l'evoluzione del quadro nel tempo.

In entrambi i tipi di monitoraggio i dati sperimentali devono avere una buona qualità statistica oltre ad essere precisi, cioè accurati e ripetibili. La sola precisione non è sufficiente a garantire l'efficienza del monitoraggio, si deve garantire la conservazione nel tempo dello strumento in ottime condizioni, in particolare per gli strumenti di tipo elettronico, dove il funzionamento è influenzato in maniera considerevole dalle condizioni ambientali.

Pertanto la misura della temperatura locale è di fondamentale importanza, in quanto consente di calcolare ed eliminare la deformazione apparente intrinseca del trasduttore dovuta all'effetto termico, inoltre, consente di valutare il meccanismo di trasmissione termica degli elementi strutturali.

Negli ultimi anni si sono sviluppati una vastità di nuovi strumenti di misura e sensori, sempre più tecnologici e precisi, nonché più economici. L'aspetto economico non è da trascurare, infatti, nel campo del monitoraggio strutturale abbiamo un grande range di prezzi, che vanno dalle centinaia ad alcune migliaia di euro. Pertanto si sta cercando di sviluppare strumenti che costino sempre meno, ma allo stesso tempo abbiano sensibilità e precisione elevate.

In questa ottica, alcuni studiosi hanno pensato di utilizzare gli smartphone per il monitoraggio strutturale. Infatti, questi sono dispositivi altamente integrati che hanno una notevole potenza

computazionale, grandi risorse di memoria e sono dotati di una varietà di sensori. Ciò li rende interessanti per le applicazioni nel campo del monitoraggio strutturale, in cui i dati devono essere registrati, elaborati, archiviati, trasmessi e visualizzati.

In particolare questi dispositivi possono essere utilizzati per monitorare spostamenti transitori quando essi sono collegati alla struttura. I sensori principalmente utilizzati sono gli accelerometri e i dispositivi audio per altoparlanti e microfono. L'obiettivo principale nell'usare questi dispositivi risiede nelle applicazioni per determinare le frequenze naturali della struttura ai fini dell'identificazione strutturale, ma può essere misurata anche l'inclinazione.

3.1 Trasduttori elettrici di spostamento collegati a centraline di acquisizione dati

I trasduttori elettrici di spostamento vengono generalmente usati nel monitoraggio di tipo dinamico quando lo spostamento tra i due lembi della fessura avviene lungo una direzione principale che coincide con l'asse strumentale e vengono lasciati permanentemente in situ.

I dispositivi vengono applicati in corrispondenza delle lesioni, o comunque dei punti critici ed è possibile registrare l'andamento nel tempo di aperture/chiusure, scorrimenti di taglio e scostamenti fuori dal piano di giacitura, rotazioni di maschi murari e di elementi strutturali portanti in c.a. ed i cedimenti degli stessi.

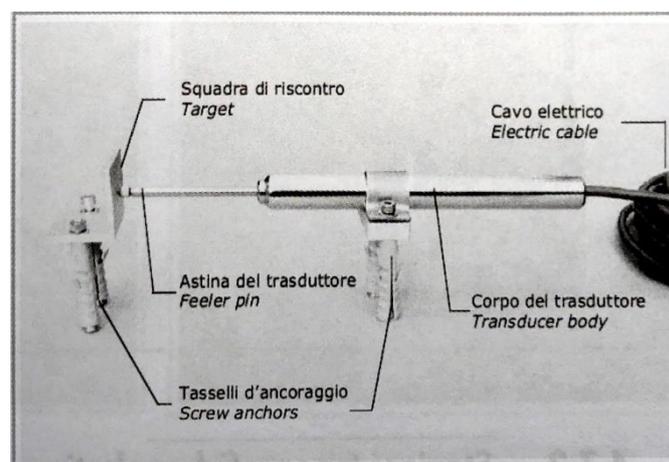


Figura 3.1: Trasduttore elettrico di spostamento

Essi sono collegati ad una box logica attraverso dei cavi elettrici, questa è collegata ad un modem GSM/GPRS che invia i dati in tempo reale ad un PC avente appositi programmi per registrarli. Inoltre esistono speciali trasduttori dotati di trasmettitori radio in grado di trasmettere le misurazioni a distanza senza l'ausilio del cavo elettrico.

La sensibilità di questi strumenti può essere centesimale o millesimale, ciò rende il monitoraggio dei quadri fessurativi semplice, preciso ed affidabile, anche se sono ancora molto costosi.

3.2 Stazioni topografiche robotizzate servo-assistite di precisione

Questi dispositivi vengono impiegati nel monitoraggio di tipo dinamico delle strutture per il rilievo e l'analisi degli spostamenti. In corrispondenza di ciascun punto di misura vengono posizionate delle mire di collimazione, protette da una struttura metallica che ne conserva le caratteristiche di precisione. La stazione totale viene collocata al di fuori della zona da monitorare sia in postazione fissa che periodica. Lo strumento è dotato della funzione di collimazione di precisione che, dopo la prima misurazione, insegue il prisma automaticamente. Al sistema è abbinato un software dedicato capace di visualizzare i valori misurati sia numericamente che graficamente.

Questi strumenti vengono utilizzati per misurare una variazione di quota, chiamata livellazione, oppure per misurare spostamenti orizzontali dell'opera.



Figura 3.2: Stazione totale



Figura 3.3: Prisma di collimazione

I monitoraggi con questa tecnica risultano precisi e affidabili, però si deve prestare particolare cura ad alcuni aspetti: il posizionamento dei prismi ottici; la conservazione in ottimo stato sia dei prismi che della stazione totale; l'elaborazione numerico/grafica delle letture rilevate. Inoltre questi strumenti che risultano essere notevolmente costosi.

3.3 Trasformatori lineari differenziali LVDT

LVDT è un acronimo di Linear Voltage Differential Transformer (Trasformatore differenziale a tensione lineare) ed è costituito da un nucleo magnetico, libero di muoversi all'interno di una cavità anulare, su cui sono presenti due avvolgimenti: uno primario ed uno secondario.

Questi strumenti permettono la misura di uno spostamento lineare, convertendo uno spostamento meccanico in un segnale elettrico. Il trasformatore differenziale è un sensore modulante in quanto richiede un generatore ausiliario per generare una tensione sinusoidale di eccitazione per il funzionamento del sensore. Questo funziona in base al principio dell'induzione elettromagnetica e trova il suo migliore utilizzo nelle applicazioni dove la risoluzione e la linearità sono decisive rispetto all'ampiezza del campo di misura. È un sensore robusto, affidabile e ripetibile. Il suo costo è però abbastanza elevato ed inoltre la sua applicazione richiede una circuiteria aggiuntiva di alimentazione e soprattutto di demodulazione abbastanza costosa.

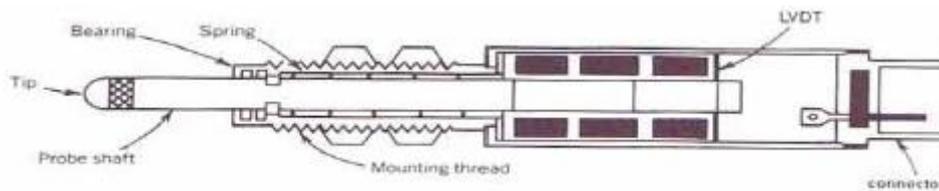


Figura 3.4: Esempio di LVDT

I trasduttori offrono diverse classi di accuratezza, fino allo 0,1% del fondo scala di misura.

Numerosi modelli standard con range di misura da $0 \div 10$ a $0 \div 1.000$ mm. Sono realizzati in diverse configurazioni e hanno un range di temperatura di utilizzo molto ampio, tipicamente da -50 °C a $+120$ °C.

3.4 Estensimetri

I sensori che consentono la misura delle deformazioni sono chiamati estensimetri: possono essere meccanici, acustici ed elettrici.

L'estensimetro elettrico consiste in una griglia di metallo laminato incollata su un supporto di materiale plastico e può avere spessore e grandezza molto piccole. Essi vengono costruiti in migliaia di configurazioni per adattarsi ad una vasta gamma di applicazioni.

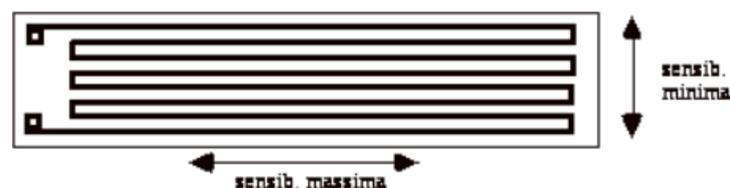


Figura 3.5: Esempio di estensimetro elettrico

Questo viene incollato sulla superficie di una determinata struttura, che quando viene sollecitata subisce delle deformazioni, trasmesse alla griglia causando una variazione di resistenza elettrica. Questa variazione è proporzionale alla deformazione e può essere misurata con grande precisione; tipicamente si ha una risoluzione di un micrometro al metro.

La risposta dell'estensimetro è istantanea, per cui ci permette di valutare sia le deformazioni statiche che le deformazioni dinamiche.

È importante scegliere l'estensimetro appropriato in base ai requisiti, quali la precisione, la durata a fatica, il campo di temperatura e le condizioni ambientali in cui il trasduttore deve essere inserito.

3.5 Accelerometri

Gli accelerometri sono dispositivi in grado di misurare le vibrazioni o le accelerazioni subite da una struttura sotto carico. Questi possono essere di due tipi: piezoelettrici oppure capacitivi.

La forza che viene generata da una vibrazione o da una variazione di movimento fa in modo che la massa comprima il materiale piezoelettrico, che genera una carica elettrica proporzionale alla forza esercitata su di esso. Quindi essendo la massa una costante, la carica elettrica generale è proporzionale all'accelerazione.

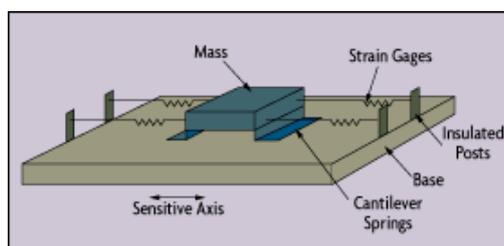


Figura 3.6: Struttura accelerometro

Esistono due tipi di accelerometri piezoelettrici. Il primo tipo è un accelerometro con carica di uscita ad alta impedenza, dove il cristallo piezoelettrico genera una carica elettrica direttamente collegata agli strumenti. Questi dispositivi risultano essere molto sofisticati e necessitano di particolari accorgimenti e strumentazioni speciali per interpretare la carica elettrica in uscita. Per questi motivi vengono utilizzati per lo più in strutture di ricerca o per applicazioni particolari, come applicazione alle alte temperature.

Il secondo tipo di accelerometro è quello con uscita a bassa impedenza, dotato di un accelerometro di carica all'estremità anteriore, ma dispone anche di un microcircuito integrato e di un transistor FET che converte la carica in tensione a bassa impedenza. Questo lo rende capace di interfacciarsi con una strumentazione standard e per questo viene comunemente utilizzato in molti ambiti.

Gli accelerometri piezoelettrici hanno un'eccellente immunità al rumore e consentono di collegare gli strumenti con lunghi cavi senza dispersione del segnale. I cristalli piezoelettrici sono in quarzo o in ceramica e sono disposti in configurazione a compressione o al taglio (shear mode). Questi hanno, però, un grosso limite intrinseco e pertanto non superabile: non sono in grado di misurare accelerazioni costanti, cioè a frequenza nulla.

Il suddetto limite viene superato dagli accelerometri di tipo capacitivo. L'elemento sensibile di questo tipo di sensore, molto semplicemente, può essere paragonato ad un condensatore piano in cui una delle due piastre cariche è libera e l'altra è fissa. Al variare della distanza tra le due piastre, dovuta per esempio ad una forza esterna, varia il campo elettrico all'interno del condensatore. Nel caso particolare in cui la forza rimane costante, il campo elettrico si mantiene costante.

Gli accelerometri piezoelettrici vengono, quindi, usati quando non interessa misurare valori costanti di accelerazione bensì fenomeni vibratorii caratterizzati da frequenze poste nel range 1-1000 Hz. Mentre gli accelerometri di tipo capacitivo vengono utilizzati quando sia in presenza di oscillazioni a bassa frequenza, tipicamente sotto 0.1 Hz. Entrambi, però, possono raggiungere alte sensibilità (1 Volt/g).

3.6 Inclinometri

Gli inclinometri consentono di misurare le variazioni di inclinazione di un corpo rigido, cioè le rotazioni subite dal corpo sotto un qualsiasi carico. Questi vengono fissati alla struttura e collegati a un sistema di acquisizione automatico e consentono, pertanto, un'osservazione per lunghi periodi con intervalli di misura programmabili.

Gli inclinometri sono disponibili in varie configurazioni, si possono avere in versione monoassiale, biassiale e triassiale; sono contenuti in una scatola per proteggerli dagli agenti atmosferici e in alcuni casi sono adatti ad essere installati in immersione a grandi pressioni. Trovano applicazione nei monitoraggi strutturali sia in fase di esecuzione che in fase di gestione dell'opera.



Figura 3.7: Inclinometro

Questi dispositivi sono costituiti da due sensori monoassiali con tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System). Gli inclinometri risultano avere una buona sensibilità, affidabilità e robustezza nel tempo, che fanno di questi strumenti un ottimo ausilio, a basso costo, per sistemi di monitoraggio dove si vogliono controllare deformazioni di strutture di qualsiasi tipo. L'installazione risulta essere molto semplice e immediata con l'ausilio di alcuni fisher e di una semplice livella ottica. Di solito si realizzano sistemi a più sensori, svincolati o collegati fra loro, per consentire un controllo più accurato di cedimenti e deformazioni delle strutture.

Gli inclinometri vengono poi collegati, tramite dei cavi elettrici o via wireless, con un sistema di lettura e acquisizione dei dati, che permette di raccogliere ed elaborare questi dati sotto forma di tabelle o grafici e quindi essere facilmente interpretati.

3.7 Misure di temperatura e umidità

Le misure di temperatura e umidità sono frequentemente utilizzate in campo strutturale per la compensazione di errori che le variazioni di tali grandezze causano alla misura principale rilevata attraverso i più disparati strumenti.

Un sensore di temperatura è installato in prossimità dello strumento di misura in modo che possa essere effettuata una correzione della deriva causata da variazioni termiche. A maggior ragione quando lo strumento è costituito da aste e fili, oppure siano in esso presenti fluidi idraulici, è imprescindibile l'abbinamento con un termometro per poter correggere i dati ottenuti e annullare eventuali effetti di mascheramento. La misura della temperatura e dell'umidità è interessante anche come ricerca di parametri cosiddetti principali, laddove si abbia a che fare con processi fortemente soggetti a tali grandezze.

Sul mercato sono presenti diversi tipi di sensori per la misura della temperatura e si distinguono in base al principio che sfruttano per la misura:

- Termoresistenze, o termometri a resistenza, sfruttano la caratteristica insita nei materiali che variano la propria resistività al variare della temperatura, mantenendo fra queste una proporzione lineare. Quindi misurata la resistenza si ha la temperatura. Il sensore è realizzato da una bobina in rame o platino racchiuse in un involucro protettivo, ciò le rende utilizzabili in tutte le condizioni e spesso in accoppiata con altri sensori.

- Termistori, sfruttano ancora la variabilità della resistenza elettrica di un materiale con la temperatura. Sono simili alle termoresistenze, con la sola differenza che l'elemento sensore non è più un conduttore ma un semiconduttore.
- Termocoppie, sfruttano la caratteristica derivante dalla proprietà termoelettrica dei materiali conduttori o semiconduttori di generare elettricità quando sottoposti ad un gradiente termico. Presi due conduttori o semiconduttori di materiali diversi e uniti ad una estremità, se questa viene sottoposta ad un gradiente di temperatura, ai capi dei due conduttori si genera una differenza di potenziale proporzionale alla temperatura applicata. Questi richiedono, inoltre, apposite centraline per effettuare la misura.
- Termometri a corda vibrante, sfruttano la caratteristica di una corda tesata fra due punti che, sottoposta a variazione di temperatura, varia la sua lunghezza e quindi la propria frequenza di vibrazione. Anche qui sono necessarie delle unità di lettura specifiche.



Figura 3.8: Sensori di temperatura

I trasduttori di umidità sono dei particolari trasduttori in grado di rilevare la variazione dell'umidità. Sono costituiti da una pellicola di plastica su cui sono applicate delle lamine d'oro. A seconda dell'umidità la plastica si dilata, in modo da rendere possibile il riconoscimento della variazione attraverso la variazione di resistenza offerta dall'insieme delle lamine d'oro. Il trasduttore fa parte di un circuito elettronico che in uscita fornisce un segnale in tensione proporzionale all'umidità relativa. Questo viene montato all'interno di una scatola a ventilazione naturale che consente di proteggere l'elemento sensibile dalle radiazioni, dagli agenti atmosferici ed in generale da tutte le contaminazioni dovute a presenza di polveri. Il materiale che costituisce la scatola, e la sua geometria, sono tali da non influenzare il tempo di risposta del trasduttore.



Figura 3.9: Sensore d'umidità

I sensori sono progettati per lavorare tra il 10% e il 90% di umidità e hanno una precisione nominale del 5% in condizioni di lavoro pessime, invece, in condizioni normali gli errori sono sensibilmente minori. Inoltre, l'inquinamento dell'aria può provocare qualche problema al funzionamento dei trasduttori.

4 MODELLI TEORICI

4.1 Ricostruzione dell'andamento della deformata tramite un polinomio

4.1.1 Valutazione abbassamento con sensori di spostamento e inclinometri

La praticabilità di un ponte è generalmente valutata attraverso la comparazione fra la freccia aspettata dagli ingegneri e quella misurata durante le prove di carico o a lungo termine. La maggior parte dei metodi presenti non permettono la determinazione della freccia utilizzando i dati di deformazione dei sensori presenti sul ponte.

Vurpillot et al. in [21] hanno sviluppato un metodo matematico che permette la determinazione del campo di spostamenti dalle misure di deformazioni interne orizzontali e aiuta nella progettazione della rete di sensori richiesta.

Allo scopo di determinare il campo di spostamenti complessivo di una struttura dalla misurazione delle deformazioni interne questo algoritmo usa la relazione fra l'abbassamento verticale e la curvatura di una trave lineare.

Se si considera la legge di conservazione delle sezioni piani di Bernoulli, l'abbassamento di una trave caricata uniformemente su n campate è dato da n polinomi di grado 4 con continuità C_1 sul bordo¹. Ogni dominio polinomiale include una sezione della trave che abbia un'inerzia costante, un carico uniforme costante, e forze e momenti finali. La derivata seconda dell'abbassamento dà n polinomi di secondo grado, che rappresentano la curvatura della sezione come dimostrato nell'equazione (4.1).

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (4.1)$$

Ma la curvatura è anche correlata all'elongazione delle fibre di una trave attraverso la relazione (4.2):

$$\frac{1}{r(x)} = -\frac{\varepsilon(x)}{y} \quad (4.2)$$

dove: r è il raggio di curvatura, x è l'ascissa curvilinea lungo la trave, ε è la deformazione di elongazione e y è la distanza dall'asse neutro. Per cui per misurare la curvatura in un punto della

¹ La funzione e la sua derivata sono continue lungo il contorno.

trave è possibile utilizzare due misuratori di spostamento, uno nella parte superiore della trave e una nella parte inferiore, come mostrato in **Figura 4.1**.

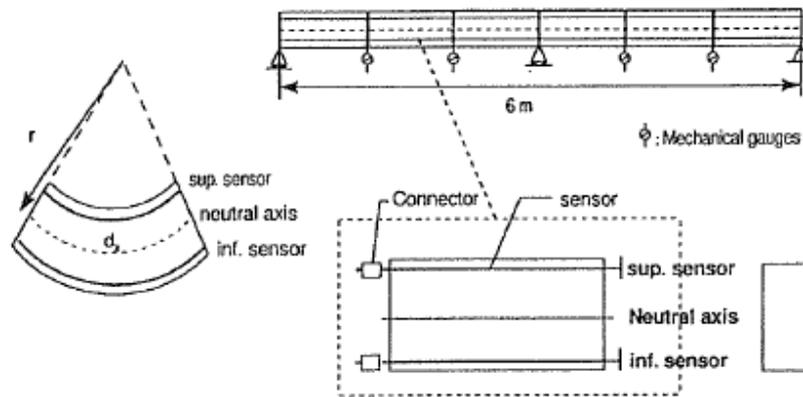


Figura 4.1: Esempio di configurazione di sensori per determinare la curvatura

La funzione curvatura può essere espressa attraverso un polinomio di secondo grado, come mostrato nella relazione (4.3):

$$P^2(x) = ax^2 + bx + c \quad (4.3)$$

Questo polinomio di secondo grado presenta tre incognite, sono necessarie, pertanto, tre misure indipendenti di curvatura per determinare i tre coefficienti per ciascuna sezione. Per ricavare la funzione di abbassamento bisogna integrare l'equazione (4.3) due volte, andando a garantire la continuità C_1 della funzione lungo i bordi. La funzione di abbassamento sarà data dalla seguente equazione (4.4):

$$P^4(x) = \iint P^2(x) dx' + \alpha x + \beta \quad (4.4)$$

Dove le costanti di integrazione α e β sono ottenute andando ad imporre le condizioni al contorno per la trave.

Pertanto utilizzando il metodo di *Vurpillot et al.* precedentemente descritto, è possibile ricavare il campo di spostamenti di ciascuna trave andando a posizionare tre sensori di spostamento relativo, posizionati in differenti punti della trave analizzata. Le ipotesi fatte precedentemente sono in accordo con la teoria della trave di Bernoulli-Navier e richiedono la conoscenza delle condizioni al contorno di ciascuna trave. Le ipotesi di Bernoulli sono di solito soddisfatte in condizioni di esercizio, mentre le condizioni al contorno sono note in generale.

Con questa metodologia è in grado di estrarre la deformazione della trave, ma non gli spostamenti di corpo rigido nello spazio. Per ottenere informazioni su questi spostamenti, oltre

agli strumenti che forniscono gli spostamenti relativi vengono posizionati altri strumenti, come GPS e inclinometri, che forniscono misure rispetto ad un sistema di riferimento assoluto.

Generalmente per determinare il diagramma di curvatura può essere usata una funzione di secondo grado (equazione (4.3)). Ipotizzando che la posizione dell'asse neutro non sia nota, sono sufficienti tre paia di sensori per determinare l'abbassamento della trave. Un numero maggiore di sensori migliorerà la precisione della misurazione attraverso un algoritmo di adattamento minimo e aggiungerà una certa ridondanza utile in caso di malfunzionamento del sensore.

4.1.2 Valutazione dell'abbassamento usando misure di deformazione e rotazione

I sistemi di monitoraggio attuali applicati ai ponti in calcestruzzo armato consistono in strain gauges per misurare le deformazioni locali, inclinometri per misurare le rotazioni, accelerometri per misurare le accelerazioni e trasduttori di spostamento per misurare gli spostamenti dei vincoli. L'abbassamento è uno dei parametri fondamentali da misurare sulla campata di un ponte, in quanto riflette tutto il comportamento del ponte e dà informazioni sulla sua performance in servizio. Allo stesso tempo risulta molto complicato misurare l'abbassamento in modo diretto, pertanto, sono stati implementati vari metodi, più o meno efficaci e costosi, ma soprattutto c'è la necessità che siano più speditivi possibile.

Le deformazioni e le rotazioni sono misure indirette dell'abbassamento del ponte. Quindi usando le misure ricavate da questi sensori e la capacità computazionale dei computer attuali, molti autori hanno provato a stimare lo spostamento verticale basandosi sulle deformazioni del calcestruzzo e le rotazioni. Tra questi vi è il metodo presentato nella sezione precedente da *Vurpillot et al.* in [21] del 1998, dove le misure di deformazione e rotazione sono state utilizzate come condizioni al contorno per ricavare il polinomio che rappresenta la funzione di abbassamento.

Sulla base di questi articoli *Sousa et al.* in [22] hanno sviluppato un metodo che dimostra la stabilità dell'approccio polinomiale per stimare la funzione abbassamento di un ponte, applicandolo anche a delle strutture reali. Sono state usate le misurazioni fatte da un sistema di monitoraggio dedicato alla sorveglianza e manutenzione, composto da inclinometri sui supporti e strain gauges in mezzzeria e vicini i supporti.

Inoltre, è stata sviluppata e implementata una procedura automatizzata in un software, chiamato MENSUSMONITOR, dedicata alla gestione, trattamento ed analisi dei risultati monitorati. Questa capacità di gestione dati ha portato alla possibilità di visualizzare i risultati anche in tempo reale.

Come prima cosa si è creato un database con tutte le misurazioni fatte dai sensori in ogni sezione critica S_i , con $i = 1, 2, \dots, n$, generalmente posizionate in mezzeria e vicino gli appoggi del ponte (Figura 4.2).

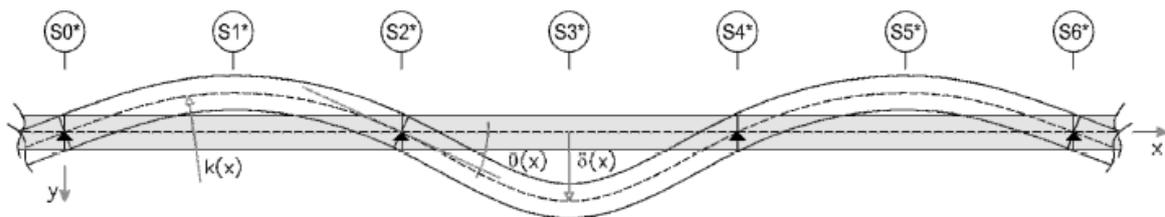


Figura 4.2: Deformata del ponte e sezioni critiche dove sono posizionati gli strumenti

Considerando le ipotesi di Bernoulli², la curva di abbassamento di una trave uniformemente caricata con m è espressa da una successione di m polinomi di quarto grado. Ogni campata è considerata con inerzia costante, uniformemente caricata e soggetta a forze e momenti finali. Anche se le ipotesi di Bernoulli non sono valide nel caso reale, soprattutto vicino gli appoggi e nelle aree in cui è applicato un carico concentrato, possiamo dire che per carichi moderati la funzione abbassamento è rappresentata da una curva morbida, dove l'abbassamento è considerevolmente piccolo rispetto alla lunghezza della campata. Pertanto è ragionevole usare una funzione polinomiale per approssimare l'abbassamento del ponte.

Come detto nella sezione precedente la curvatura di una sezione trasversale può essere espressa dall'equazione (4.1). La curvatura può anche essere espressa sulla base della deformazione di due fibre diverse, misurando la deformazione attraverso due strain gauges posizionati uno sulla fibra superiore e uno sulla fibra inferiore, come mostrato in Figura 4.3 e si ottiene la seguente espressione:

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{\varepsilon_{bot}(x) - \varepsilon_{top}(x)}{H(x)} \quad (4.5)$$

dove: ε_{bot} è la deformazione della fibra inferiore, ε_{top} è la deformazione della fibra superiore e H rappresenta la distanza fra le due fibre.

² Sezioni piane dopo la deformazione.

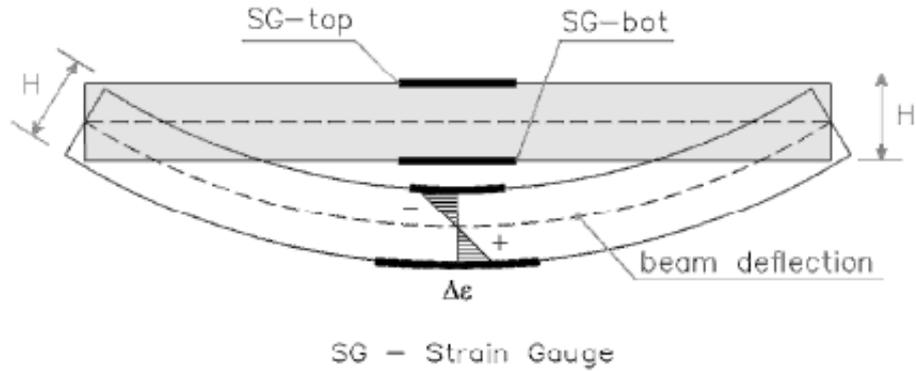


Figura 4.3: Curvatura di una sezione basata sulle misurazioni degli strain gauges

Andando ad eguagliare l'equazione (4.1) e l'equazione (4.5), si ottiene che le misure date dagli strain gauges forniscono delle condizioni al contorno per la funzione polinomiale di secondo ordine della curvatura, come mostrato nell'equazione (4.6):

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = \frac{\varepsilon_{bot}(x) - \varepsilon_{top}(x)}{H(x)} \quad (4.6)$$

Per quanto riguarda la rotazione, questa può essere espressa in funzione dell'abbassamento andando a considerarne la derivata prima, data la piccola entità dello spostamento, come mostrato nell'equazione (4.7):

$$\theta(x) = \frac{dv(x)}{dx} \quad (4.7)$$

Tornando alla funzione abbassamento, come detto in precedenza, può essere interpretata attraverso l'utilizzo di una funzione polinomiale per ogni campata. Quest'ultima è calcolata in base alle condizioni al contorno, come in **Figura 4.4** dove si mettono in evidenza le condizioni al contorno generiche per la trave semplicemente appoggiata nelle sezioni di mezzeria e sugli appoggi.

Le sopracitate condizioni al contorno sono: spostamento verticale nullo sugli appoggi e curvature nulle sugli appoggi esterni; curvature e rotazioni ricavate dalle letture dei sensori.

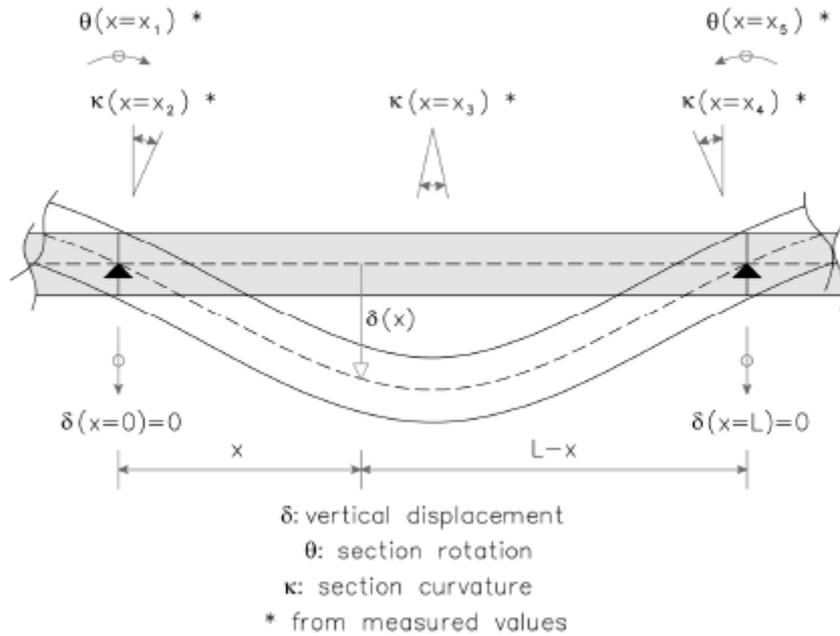


Figura 4.4: Condizioni al contorno per trave semplicemente appoggiata

Per una generica campata j , se sono note $n+1$ condizioni al contorno, allora il polinomio che interpola l'abbassamento $v_j(x)$ è una funzione polinomiale di grado n , con la seguente formulazione matematica (equazione 4.8).

$$v_j(x) \cong P_j^n(x) = \sum_{p=0}^n c_{j,p} \cdot x^p \quad (4.8)$$

Questa scrittura corrisponde a scrivere una sistema di n equazioni lineari e può essere espresso in forma matriciale, come rappresentato nell'equazione (4.9).

$$[A]_j \cdot \{c\}_j = \{b\}_j \quad (4.9)$$

La matrice $[A]$ dipende solo da quantità geometriche, cioè la posizione degli strumenti x_i e la lunghezza della campata L ; il vettore $\{c\}_j$ rappresenta le incognite del problema, ovvero i coefficienti del polinomio; mentre il vettore $\{b\}_j$ rappresenta le condizioni al contorno imposte. Pertanto il problema viene risolto andando a svolgere il calcolo matriciale, però si deve imporre che la matrice $[A]$ sia non singolare, questo avviene quando i vincoli sono linearmente indipendenti.

$$\{c\}_j = [A]_j^{-1} \cdot \{b\}_j \quad (4.10)$$

Come detto in precedenza *Sousa et al.* hanno implementato questo procedimento in un software esistente, specifico per il trattamento, elaborazione e analisi dei dati provenienti da sistemi di monitoraggio montati su ponti, chiamato MENSUSMONITOR. L'inserimento di questa

metodologia in questo software ha portato ad avere un'applicazione più facile e veloce, comparandola con altri strumenti comunemente sul mercato come i fogli di calcolo.

Inoltre, è possibile estendere la procedura ad un ciclo temporale o ad un periodo osservazione più o meno lungo, in cui ad ogni istante t si ha un registro con tutte le misure del sensore, ovvero deformazioni ε e rotazioni θ .

Pertanto, queste caratteristiche rendono il tempo di gestione dei dati significativamente ridotto e offrono il vantaggio di poter visualizzare in tempo reale connettendosi direttamente al sistema di acquisizione. Andando ad aumentare il numero di sezioni trasversali strumentalizzate con sensori, si riesce ad affinare sempre di più il risultato ed ottenere una maggiore corrispondenza tra i valori misurati sulla struttura e quelli interpolati dalla funzione polinomiale.

Per migliorare ancora di più la precisione dei risultati, per una trave continua su più appoggi *Sousa et al.* hanno imposto la continuità della rotazione sugli appoggi, così si riduce ancora di più l'errore tra il valore di abbassamento misurato e quello derivato dalla funzione polinomiale per una determinata sezione della trave.

Inoltre, usando le misure di rotazione per la valutazione della deflessione del ponte è stato possibile definire la posizione relativa degli inclinometri lungo lo sviluppo della trave.

4.1.3 Applicazioni

4.1.3.1 Valutazione analitica dell'abbassamento basandosi su curvature e inclinazioni prive di errore (modello FEM)

Si è applicato il metodo polinomiale, sviluppato prima da *Vurpillot et al.* e successivamente da *Sousa et al.*, ad una tipica trave da ponte in cemento armato su due appoggi della lunghezza di 10 m, sezione trasversale ad I (**Figura 4.5**) e caricata con un carico uniformemente distribuito di 100 kN/m. Le caratteristiche della trave sono presentate nella **Tabella 4.1**.

Questa trave è stata implementata nel software DOLMEN 3D STRUTTURA, dove sono stati ricavati i valori di rotazione, curvatura e abbassamento da utilizzare come condizioni al contorno per ricavare la funzione polinomiale che interpola lo spostamento verticale della trave. Usando questa procedura si cerca di eliminare tutti gli errori o rumori presenti in un caso reale o in una prova di laboratorio, andando a semplificare in qualche modo il sistema.

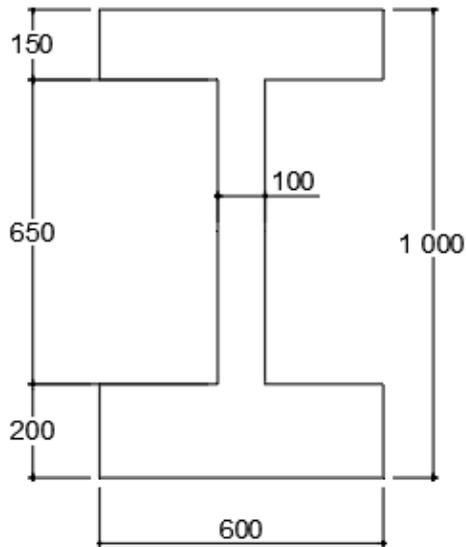


Figura 4.5: Sezione della trave (misure in mm)

Caratteristiche della trave			
Lunghezza trave	L	10	m
Larghezza sezione	b	0.6	m
Larghezza anima	b_w	0.1	m
Altezza sezione	H	1	m
Altezza base superiore	h_{sup}	0.15	m
Altezza base inferiore	h_{inf}	0.2	m
Area sezione	A	0.275	m ²
Momento d'inerzia	I	0.038114	m ⁴
Materiale			
Modulo di Young	E_c	30000	Mpa
Modulo di Poisson	ν	0.15	-
Modulo di taglio	G	13000	MPa

Tabella 4.1: Caratteristiche della trave

Sfruttando quanto riportato da *Sousa et al* in [22] si sono trovate le posizioni ideali dei sensori per avere una risposta migliore. In questa applicazione non sono stati utilizzate le letture del sensore, ma si sono estrapolate le quantità che servivano per l'analisi dal modello agli elementi finiti fatto con il software. Inoltre, sono stati studiati due casi differenti, nel primo caso si è supposto di avere a disposizione le letture di rotazione in sei punti della trave, mentre nel secondo caso si è supposto di avere tre valori di curvatura. In entrambi i casi come condizioni al contorno sono state utilizzate le letture degli ipotetici sensori e come ulteriori condizioni al contorno si è considerato l'abbassamento verticale nullo sugli appoggi.

Per il primo caso, cioè quello con i sei valori di inclinazione, le posizioni ideali sono state individuate nei punti seguenti: sugli appoggi, a $0.15L$ da entrambi gli appoggi e a $0.30L$ da entrambi gli appoggi (**Figura 4.6**), dove L è la lunghezza della trave.

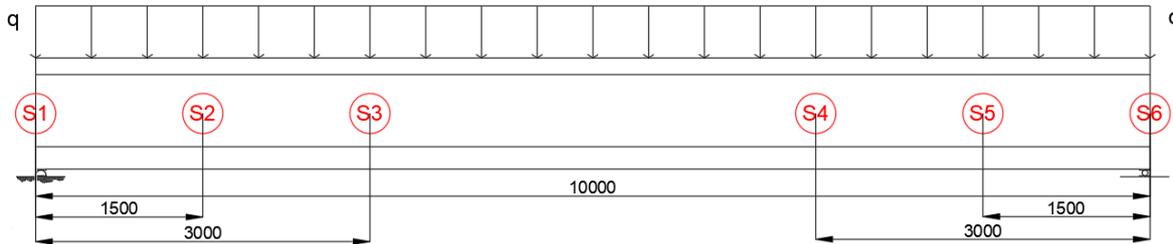


Figura 4.6: Schema statico e posizione dei sensori per il caso 1 (misure in mm)

Come detto precedentemente, si sono ottenute otto condizioni al contorno e di conseguenza la funzione polinomiale che approssima l'andamento dell'abbassamento della trave è di settimo grado, come mostrato nell'equazione (4.11).

$$\delta(x) = ax^7 + bx^6 + cx^5 + dx^4 + ex^3 + fx^2 + gx + f \quad (4.11)$$

Dove le incognite del problema risultano essere i coefficienti di tutte le x , che verranno determinate attraverso il calcolo matriciale proposto nell'equazione (4.9). Nella **Tabella 4.2** sono mostrati i valori delle rotazioni ricavate dal software DOLMEN nei punti precedentemente citati.

Sezione x_i [m]	Rotazione θ_i misurata [rad]	Abbassamento δ_i misurato [mm]
0	-0.00473724	0.000
1.5	-0.00416166	[-]
3	-0.00269075	[-]
7	0.00269075	[-]
8.5	0.00416166	[-]
10	0.00473724	0.000

Tabella 4.2: Tabella condizioni al contorno per il caso 1 (6 inclinometri)

Quindi si può procedere attraverso i prodotti matriciali a ricavare le incognite del problema, cioè il vettore $\{c\}$ dei coefficienti (**Tabella 4.3**). Per ogni punto della nostra trave si è in grado di ricavare il valore dello spostamento verticale e quindi ottenere il grafico della deformata approssimata attraverso la funzione polinomiale di settimo grado, come mostrato nella equazione (4.12).

$$\delta(x) = 1.30 \cdot 10^{-12}x^6 - 3.91 \cdot 10^{-11}x^5 - 4.74 \cdot 10^{-6}x^4 + 9.47 \cdot 10^{-5}x^3 + 5.48 \cdot 10^{-9}x^2 - 0.0047x \quad (4.12)$$

a	0
b	1.30153E-12
c	-3.9046E-11
d	-4.7368E-06
e	9.47424E-05
f	5.48077E-09
g	-0.00473724
h	0

Tabella 4.3: Coefficienti incogniti ricavati attraverso il prodotto matriciale (caso 1)

Nella **Figura 4.7** viene mostrato l'andamento della funzione polinomiale che descrive l'abbassamento della trave lungo la sua lunghezza e viene confrontata con i valori di abbassamento restituiti dal software nei punti dove nella pratica ci dovrebbero essere i sensori.

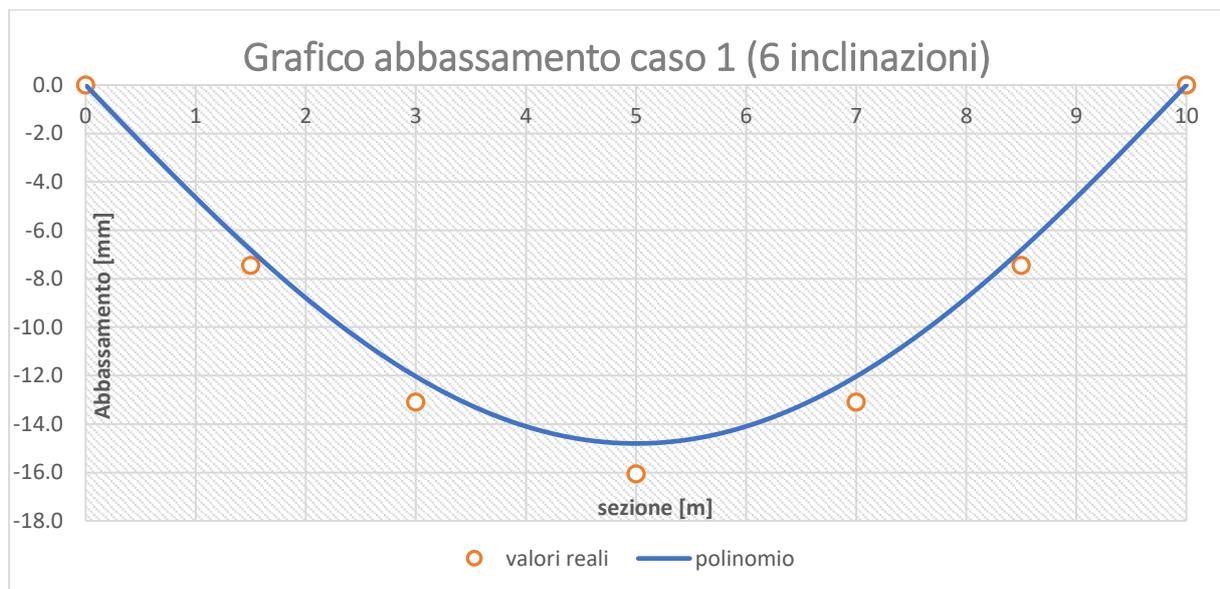


Figura 4.7: Andamento dell'abbassamento della trave per il caso 1

Dove con il colore blu è rappresentato l'andamento della funzione abbassamento approssimata con il polinomio di grado sette, mentre i punti arancioni rappresentano il valore di abbassamento misurato dal software in quel punto. La funzione che interpola i valori reali è una funzione di quarto grado in accordo con quanto si trova in letteratura, cioè che la funzione della linea elastica è rappresentata da un polinomio di quarto grado. Allo stesso modo, si può notare un

comportamento analogo nel caso della funzione polinomiale ricavata come i coefficienti di grado superiore al quarto siano pressoché nulli (**Tabella 4.3**).

Andando a confrontare nei punti prestabiliti il valore di abbassamento misurato sul software e il valore restituito dalla funzione polinomiale per lo stesso punto, è possibile ottenere l'errore percentuale che viene commesso andando a valutare l'andamento della deformata con questo metodo. Nella **Tabella 4.4** vengono identificati i valori di abbassamento misurato e quello ricavato dal metodo polinomiale e il relativo errore percentuale tra i due.

Sezione	Abbassamento misurato	Abbassamento dal polinomio	Errore
x_i [m]	$\delta(x_i)$ [mm]	$\delta(x_i)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.000
1.5	-7.448	-6.810	-8.560
3	-13.087	-12.037	-8.023
5	-16.054	-14.804	-7.787
7	-13.087	-12.037	-8.023
8.5	-7.448	-6.810	-8.560
10	0.000	0.000	0.000

Tabella 4.4: Confronto valori di abbassamento e relativi errori per il caso 1

Come riportato in tabella l'errore per ogni punto considerato si attesta attorno all'otto percento, che può essere considerato un valore accettabile vista l'approssimazione. Inoltre è possibile migliorare la precisione del metodo, come detto da *Sousa et al.* in [22], andando ad aumentare il numero di sensori e quindi le condizioni al contorno e il grado del polinomio interpolante.

Inoltre si è pensato di includere nelle misure di inclinazione ricavate dal software anche un errore dovuto alla precisione dello strumento di misura per caratterizzare il comportamento del metodo anche in questo caso. Come è noto, in commercio ci sono diversi tipi di dispositivi in grado di misurare la rotazione in un punto con una precisione che varia a seconda del tipo di componenti all'interno e dell'azienda produttrice, allo stesso modo, varia anche il prezzo. Pertanto si deve trovare un compromesso. Si è considerato in prima battuta un errore del $\pm 2\%$ sulla misura di inclinazione e questo ha portato ad un errore fra il valore misurato su DOLMEN e il valore dato dal metodo polinomiale ad un errore che varia tra il sei e il dieci percento. Questo errore può essere considerato ancora accettabile in questo caso, perché essendo valori provenienti da un software sono sempre affetti da un qualche tipo di approssimazione.

Per concludere viene fatto un confronto grafico in **Figura 4.8** fra la curva data dai valori esatti, quelle affette da errore massimo o minimo e i valori misurati.

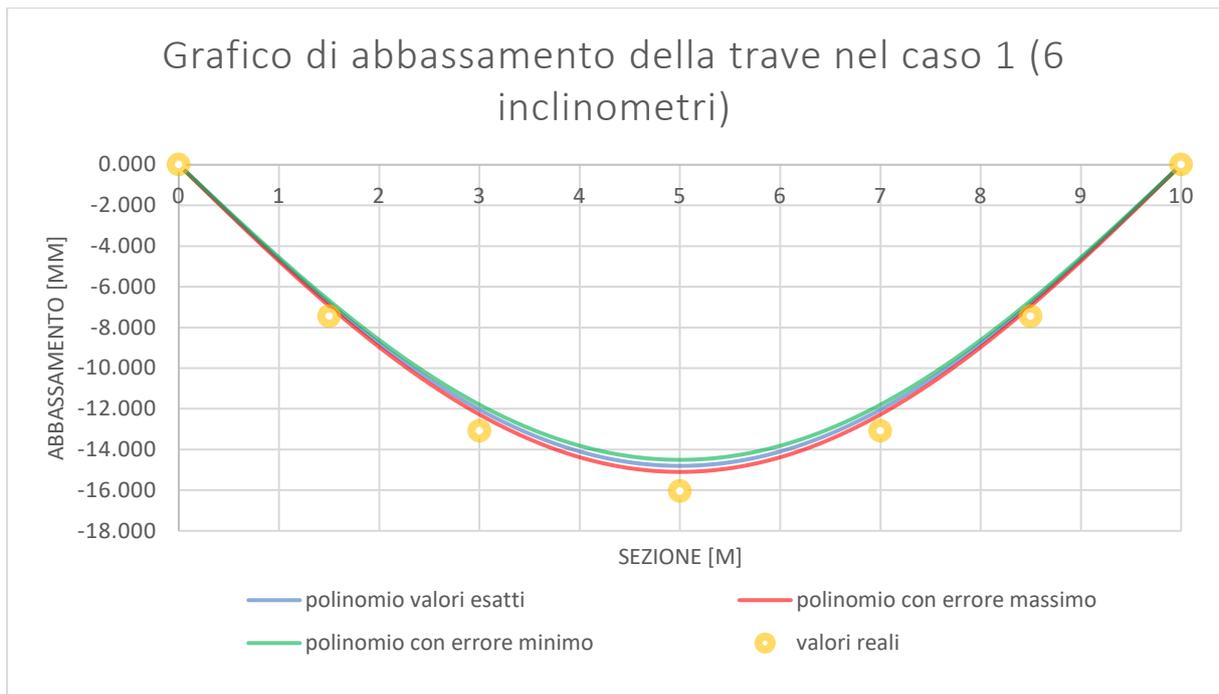


Figura 4.8: Grafico confronto curve con valori esatti, con errore massimo e minimo e valori misurati (caso 1)

Per il secondo caso, cioè la trave con i 3 valori di curvatura, si è seguito lo stesso procedimento del caso precedente però i valori di curvatura sono stati misurati a $0.15L$ da entrambi gli appoggi ed un altro a $L/2$ (**Figura 4.9**), dove L è la lunghezza della trave.

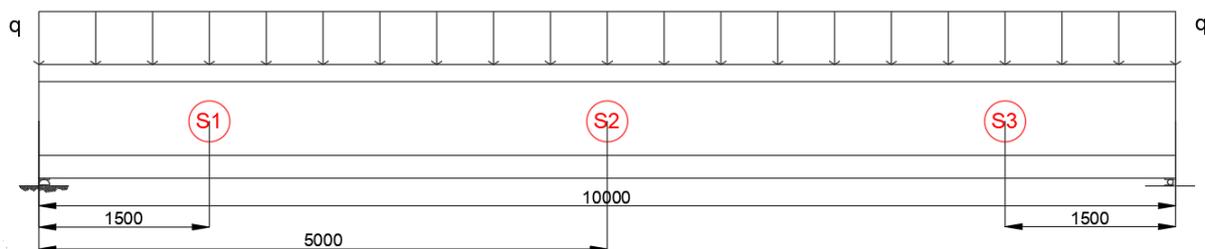


Figura 4.9: Schema statico e posizione dei sensori per il caso 2 (misure in mm)

Pertanto, le condizioni al contorno risultano essere cinque, ovvero le curvature nei punti detti precedentemente e l'abbassamento nullo sugli appoggi. Si ottiene così un polinomio di quarto grado, come mostrato nell'equazione (4.13).

$$\delta(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (4.13)$$

Come si è fatto per l'altro caso vengono mostrati nella **Tabella 4.5** le condizioni al contorno ricavate da DOLMEN, che saranno utilizzate per ricavare i coefficienti incogniti $\{c\}$. Utilizzando il calcolo matriciale si ottengono i risultati mostrati nella **Tabella 4.6**.

Sezione x_i [m]	Curvatura κ_i misurata [mm ⁻¹]	Abbassamento δ_i misurato [mm]
0	[-]	0.000
1.5	0.000725	[-]
5	0.001421	[-]
8.5	0.000725	[-]
10	[-]	0.000

Tabella 4.5: Tabella condizioni al contorno per il caso 2 (3 curvatures)

a	-4.73724E-06
b	9.47448E-05
c	0
d	-0.004737238
e	0

Tabella 4.6: Coefficienti incogniti ricavati attraverso il calcolo matriciale (caso 2)

Una volta ricavati i coefficienti è possibile scrivere la funzione polinomiale dell'abbassamento nel seguente modo:

$$\delta(x) = -4.74 \cdot 10^{-6}x^4 + 9.47 \cdot 10^{-5}x^3 - 0.00474x \quad (4.14)$$

Nella **Figura 4.10** viene mostrato l'andamento della funzione polinomiale lungo la lunghezza della trave (curva blu) e viene confrontato con i valori puntuali di abbassamento ricavati dal software (punti arancioni), come nel caso precedente viene anche fornita un'interpolazione polinomiale di questi punti (curva arancione) per confrontare i due andamenti.

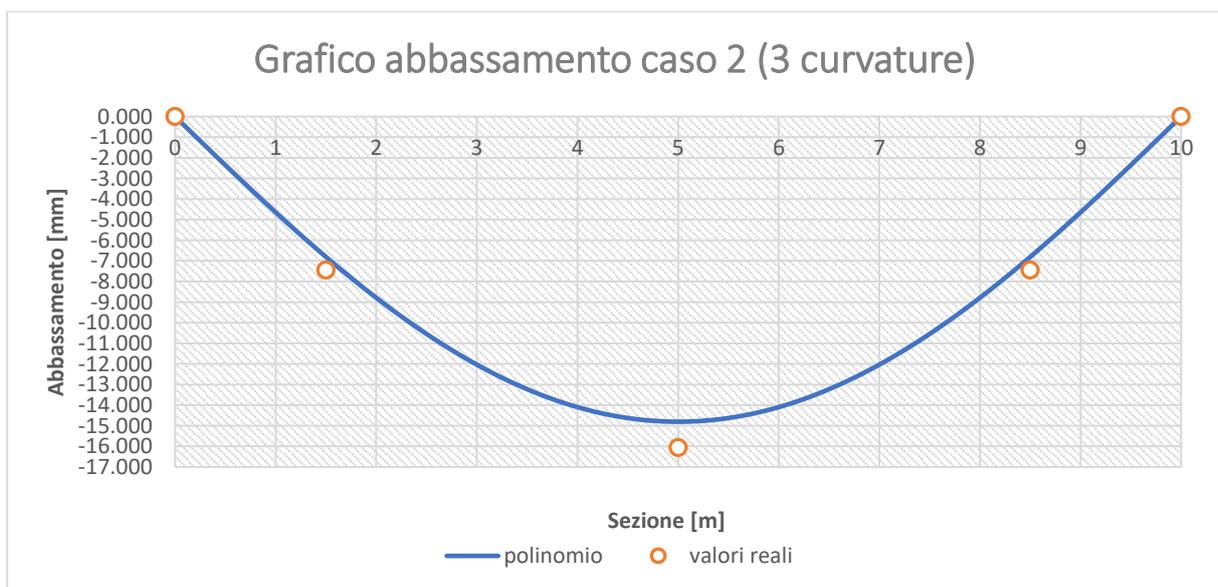


Figura 4.10: Andamento dell'abbassamento della trave per il caso 2

Andando a confrontare nei punti prestabiliti il valore di abbassamento misurato sul software e il valore restituito dalla funzione polinomiale per lo stesso punto, è possibile ottenere l'errore percentuale che viene commesso andando a valutare l'andamento della deformata con questo metodo. Nella **Tabella 4.7** vengono specificati i valori di abbassamento misurato e quello ricavato dal metodo polinomiale e il relativo errore percentuale tra i due.

Sezione	Abbassamento misurato	Abbassamento dal polinomio	Errore
x_i [m]	$\delta(x_i)$ [mm]	$\delta(x_i)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.000
1.5	-7.448	-6.810	-8.560
5	-16.054	-14.804	-7.786
8.5	-7.448	-6.810	-8.560
10	0.000	0.000	0.000

Tabella 4.7: Confronto valori di abbassamento e relativi errori per il caso 2

Come si può notare, anche in questo caso l'errore si attesta attorno all'otto percento, che è un valore accettabile. Per migliorare ancora di più la precisione si potrebbe pensare di aggiungere dei sensori in altri punti significativi della trave.

Anche in questo caso si è ipotizzato di avere un errore del $\pm 2\%$ sulla misura della curvatura e questo ha portato ad un errore fra il valore misurato su DOLMEN e il valore dato dal metodo polinomiale ad un errore che varia tra il sei e il dieci percento, anche per questo caso. Questo errore può essere considerato ancora accettabile, perché essendo valori provenienti da un software sono sempre affetti da un qualche tipo di approssimazione. In **Figura 4.11** viene mostrato l'andamento grafico delle 3 curve e i valori misurati sul software, dove è possibile notare l'errore fra una curva e un'altra.

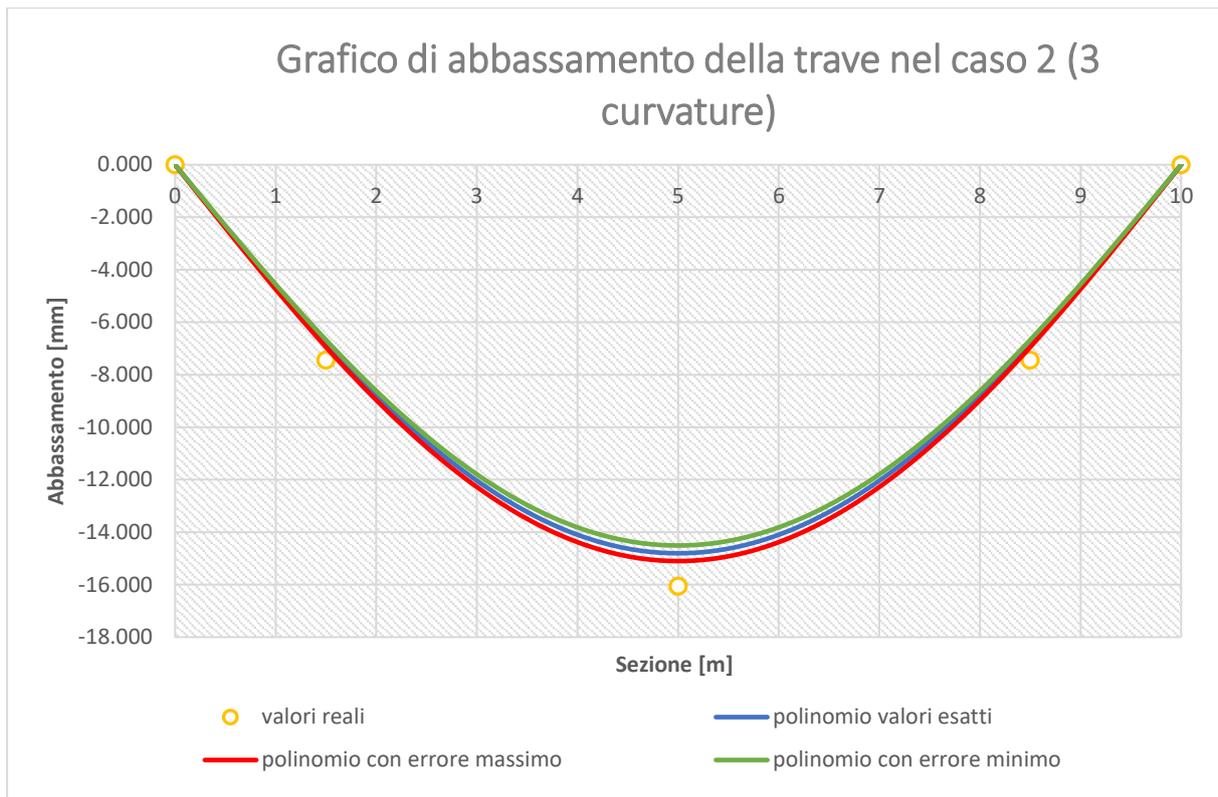


Figura 4.11: Grafico confronto curve con valori esatti, con errore massimo e minimo e valori misurati (caso 2)

4.1.3.2 Valutazione dell'abbassamento basandosi su misure sperimentali effettuate in una prova di laboratorio

Ora si è applicato il metodo polinomiale, descritto precedentemente, ad alcune travi sperimentali utilizzate da *Debernardi et al.* in [23, 24, 25] per determinare la deformazione dovuta al taglio.

Di queste travi si avevano a disposizione i valori di curvatura in vari punti della trave, dove quest'ultima era determinata attraverso l'applicazione di una coppia di estensimetri, uno posizionato nella parte superiore della trave e uno posizionato nella parte inferiore della trave. Pertanto la curvatura veniva determinata sfruttando l'equazione (4.6), utilizzando le letture dei due estensimetri. Inoltre, è presente la misura della freccia in mezzera, che ci permette di confrontarla con quella che ci restituisce la funzione polinomiale.

Le travi prese in considerazione in questo caso sono la TR1 e la TR3, che presentano condizioni di carico e lunghezza diverse, ma anche numero di coppie di estensimetri diverso con diverse posizioni di questi ultimi.

La TR1 ha una sezione trasversale ad I (**Figura 4.12**), le cui caratteristiche sono presentate nella **Tabella 4.8**. Questa è una trave semplicemente appoggiata con due carichi concentrati a 2.5 m

da entrambi gli appoggi e presenta 5 coppie di estensimetri denominati con le lettere da A a E. Lo schema statico e la configurazione dei sensori sono rappresentati in **Figura 4.13**.

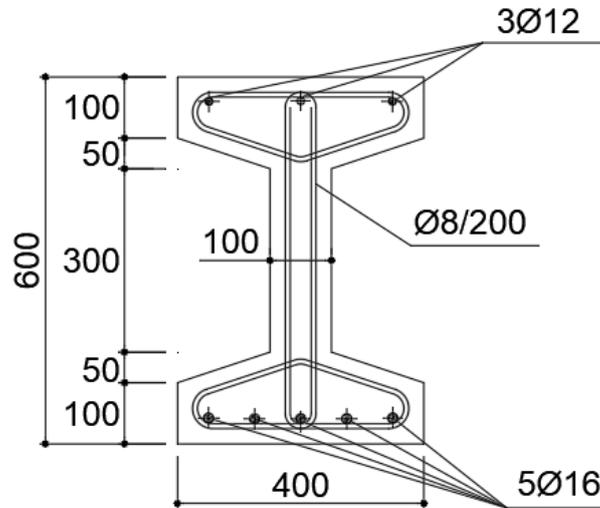


Figura 4.12: Sezione trave TR1-TR3 (misure in mm)

Caratteristiche della trave			
Lunghezza trave	L	7	m
Larghezza sezione	b	0.4	m
Larghezza anima	b_w	0.1	m
Altezza sezione	H	0.6	m
Altezza base superiore	h_{sup}	0.1	m
Altezza base inferiore	h_{inf}	0.1	m
Area sezione	A	0.135	m ²
Area armatura inferiore	A_s	1005	mm ²
Area armatura superiore	A_s'	339	mm ²
Momento d'inerzia	I	0.0611	m ⁴
Materiali			
Modulo di Young cls per la TR1	E_c	30589	MPa
Modulo di Young cls per la TR3	E_c	29962	MPa
Modulo di Young acciaio	E_s	200000	MPa

Tabella 4.8: Caratteristiche delle travi TR1 e TR3

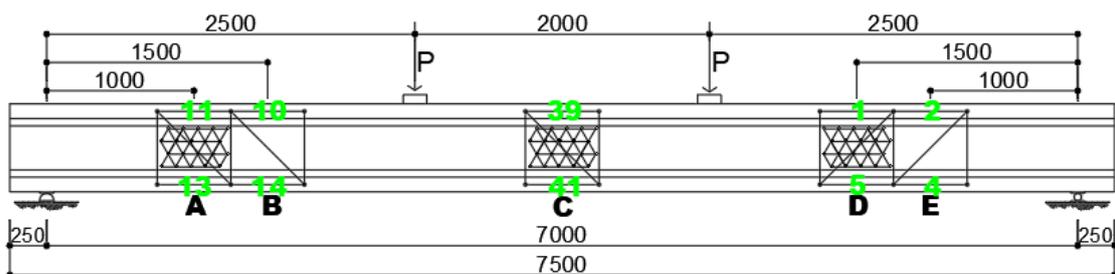


Figura 4.13: Schema statico e posizione dei sensori per la TR1 (misure in mm)

In questo caso è stato considerato un carico P di 101.03 kN, pari a circa il 50% del carico ultimo. Le condizioni al contorno del problema sono rappresentate da i cinque valori di curvatura e in più si è considerato lo spostamento verticale nullo sugli appoggi, per questo motivi si avrà una funzione polinomiale di sesto grado come la seguente:

$$\delta(x) = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g \quad (4.15)$$

Per ogni coppia di sensori si ricava la deformazione al lembo superiore e la deformazione al lembo inferiore e di conseguenza la curvatura in quei punti. In **Tabella 4.9** vengono descritte le condizioni al contorno per risolvere il sistema che ci permette di ottenere i coefficienti incogniti.

Sezione x_i [m]	Deformazione superiore ϵ_{sup} [-]	Deformazione inferiore ϵ_{inf} [-]	Distanza fra le due fibre H [mm]	Curvatura κ_i misurata [mm ⁻¹]	Abbassamento δ_i misurato [mm]
0	[-]	[-]	[-]	[-]	0.000
1	-0.00010088	0.00024187	500	6.85E-07	[-]
1.5	-0.00012538	0.00136238	500	2.98E-06	[-]
3.5	-0.00026508	0.001743378	500	4.02E-06	[-]
5.5	-0.00015565	0.00130433	500	2.92E-06	[-]
6	-0.00006407	0.00055922	500	1.2466E-06	[-]
7	[-]	[-]	[-]	[-]	0.000

Tabella 4.9: Condizioni al contorno per la TR1

Note queste quantità è possibile risolvere il sistema attraverso il calcolo matriciale per ricavare i coefficienti $\{c\}$, andando a risolvere l'equazione (4.10) e scrivendoli nella **Tabella 4.10**. Per ogni punto della nostra trave si è in grado di ricavare il valore dello spostamento verticale e quindi ottenere il grafico della deformata approssimata attraverso la funzione polinomiale di sesto grado, come mostrato nella equazione (4.16).

a	-3.27179E-21
b	7.151E-17
c	-6.3979E-13
d	2.96296E-09
e	-5.37343E-06
f	-0.004829849
g	0

Tabella 4.10: Coefficienti incogniti TR1

$$\delta(x) = -3.27 \cdot 10^{-21}x^6 + 7.15 \cdot 10^{-17}x^5 - 6.4 \cdot 10^{-13}x^4 + 2.96 \cdot 10^{-9}x^3 - 5.37 \cdot 10^{-6}x^2 - 0.0048x \quad (4.16)$$

In **Figura 4.14** è rappresentato l'andamento della deformata della trave dato dalla funzione polinomiale attraverso la curva di colore blu e viene confrontato con il valore di freccia in mezzzeria misurato sulla trave in laboratorio, rappresentato da un punto di colore arancio.

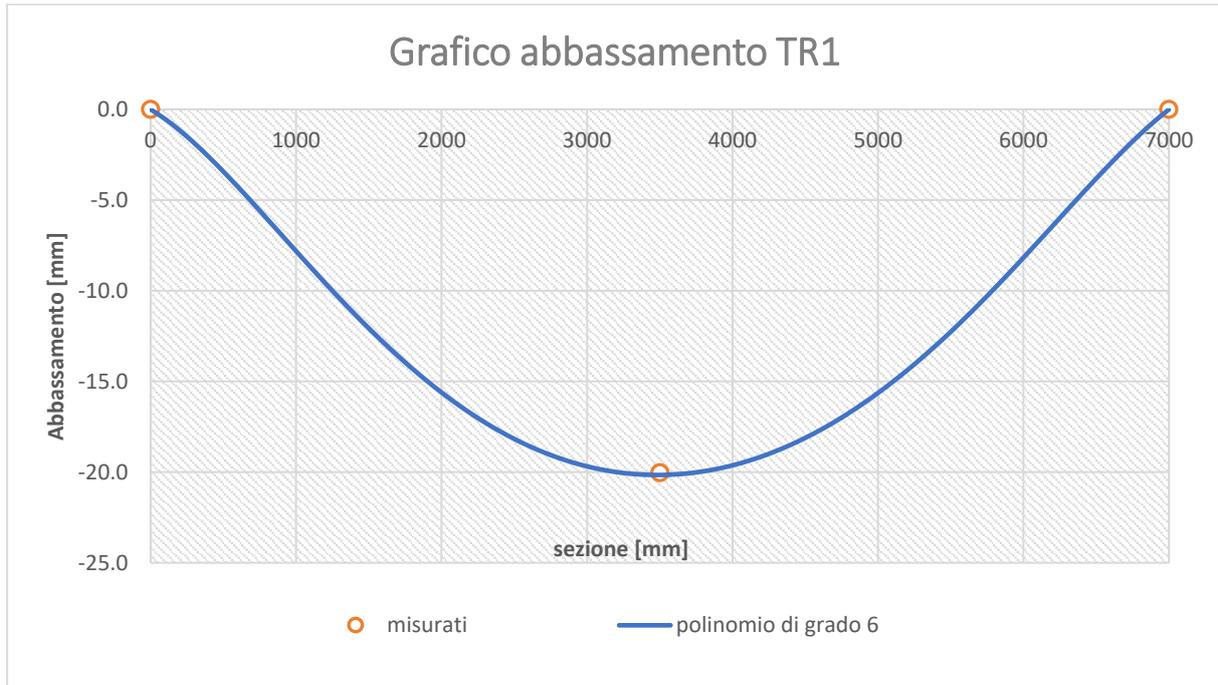


Figura 4.14: Andamento della deformata per la trave TR1

Già dal grafico è possibile vedere come l'approssimazione della funzione polinomiale risulta essere praticamente perfetta. Infatti andando a calcolare l'errore fra il valore in mezzzeria dato dalla funzione polinomiale e quello misurato in laboratorio l'errore sia dello 0.62%. Quindi questo metodo risulta particolarmente efficace in questo caso, perché restituisce pressoché il valore esatto di abbassamento della trave.

Procedimento analogo è stato seguito per la trave TR3, che presenta la stessa sezione trasversale della trave precedente (**Figura 4.12**), però con una lunghezza di 6 m e un diverso schema statico (**Figura 4.15**), cioè una trave semplicemente appoggiata con un carico in mezzzeria.

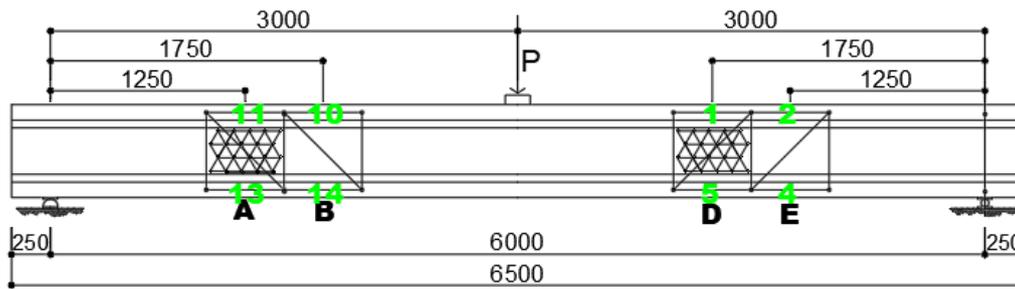


Figura 4.15: Schema statico e posizione dei sensori per la trave TR3 (misure in mm)

In questo caso le coppie di sensori, che ci permettono di determinare la curvatura, sono quattro e si trovano a 1.25 m e a 1.75 m da entrambi gli appoggi. Mentre è presente un solo carico concentrato in mezzia di 101.03 kN, che rappresenta sempre circa il 50% del carico ultimo.

Come per la trave precedente i valori dati dalle coppie di estensimetri vengono usati per determinare le curvature in quei punti e a completare le condizioni al contorno, si impone lo spostamento verticale nullo sugli appoggi (**Tabella 4.11**). In questo modo si ottiene l'equazione di quinto grado seguente:

$$\delta(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (4.17)$$

Sezione x_i [m]	Deformazione superiore ϵ_{sup} [-]	Deformazione inferiore ϵ_{inf} [-]	Distanza fra le due fibre H [mm]	Curvatura κ_i misurata [mm^{-1}]	Abbassamento δ_i misurato [mm]
0	[-]	[-]	[-]	[-]	0.000
1.25	-0.00019	0.00053	500	1.44E-06	[-]
1.75	-0.00019	0.00109	500	2.56E-06	[-]
4.25	-0.00018	0.0011	500	2.56E-06	[-]
4.75	-0.00014	0.00048	500	1.24E-06	[-]
6	[-]	[-]	[-]	[-]	0.000

Tabella 4.11: Condizioni al contorno per la TR3

Andando a risolvere il sistema attraverso il calcolo matriciale si arriva a determinare i coefficienti $\{c\}$, raggruppati nella **Tabella 4.12** e l'equazione (4.17) può essere riscritta nel modo seguente:

a	-1.90476E-18
b	-3.92063E-14
c	6.51825E-10
d	-1.31958E-06
e	-0.004611071
f	0

Tabella 4.12: Coefficienti incogniti per la TR3

$$\delta(x) = -1.91 \cdot 10^{-18}x^5 - 3.92 \cdot 10^{-14}x^4 + 6.52 \cdot 10^{-10}x^3 - 1.32 \cdot 10^{-6}x^2 - 0.00461x \quad (4.18)$$

L'equazione (4.18) ci permette di ricostruire l'andamento della deformata per ogni punto della trave. In **Figura 4.16** viene mostrato questo andamento da una curva blu e viene confrontato in mezzeria con il valore misurato in laboratorio di freccia, rappresentato da un punto arancione.

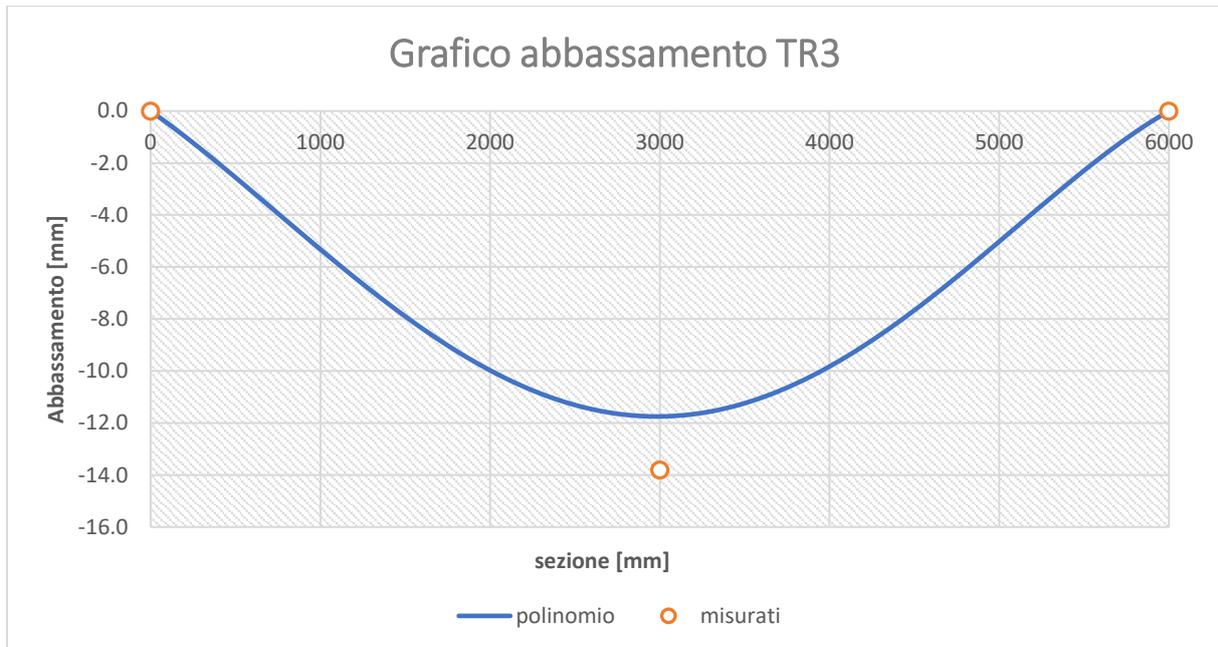


Figura 4.16: Andamento della deformata per la trave TR3

Come si può vedere dalla figura nel caso della TR3 la corrispondenza fra la funzione polinomiale e il dato reale non è così netta, infatti facendo i calcoli si è ottenuto un errore di circa il -14.86%. Questo risultato può essere accettabile in prima battuta, ma dalle ricerche fatte da *Debernardi et al.* in [23, 24, 25], si è visto che la deformata per taglio può assumere valori non trascurabili quando il rapporto L/d è vicino al 10. Quindi quello che succede in questo caso può dipendere proprio dalla deformata per taglio, infatti nel caso della TR3 il rapporto L/d si attesta proprio vicino al 10. Per cui questa deformazione non viene presa in conto nel caso del metodo polinomiale e si viene a creare un errore molto più grande rispetto al caso precedente della TR1 dove praticamente si aveva perfetta corrispondenza e il taglio non entrava in gioco o aveva un contributo piccolissimo. Questo argomento verrà trattato con maggiore accuratezza nella sezione successiva.

Successivamente si è pensato per la trave TR1 vista precedentemente di andare a ridurre il numero di strumenti per vedere cosa accadeva alla funzione approssimante dello spostamento verticale. La trave TR1 in precedenza aveva cinque coppie di sensori, che ci permetteva di

determinare la curvatura, posizionate ad 1 m e ad 1.5 m da entrambi gli appoggi e un'altra coppia posizionata in mezzeria. Quindi cinque condizioni al contorno più i due abbassamenti nulli sugli appoggi, per un totale di sette condizioni al contorno e un polinomio interpolante di sesto grado.

In prima battuta è stata eliminata la coppia di sensori in mezzeria. Pertanto il grado del polinomio interpolante scende dal sesto al quinto. Pertanto passando, come fatto in precedenza, dal calcolo matriciale si ritrovano i coefficienti incogniti del problema (**Tabella 4.13**). Noti quest'ultimi è possibile ricostruire l'andamento della deformata della trave e confrontarlo con il valore di freccia noto in mezzeria.

a	2.80236E-18
b	-1.22438E-13
c	1.33116E-09
d	-2.94412E-06
e	-0.009350243
f	0

Tabella 4.13: Coefficienti incogniti per la TR1 senza estensimetro in mezzeria

In **Figura 4.17** viene mostrato un confronto tra la curva di sesto grado ottenuta in precedenza (linea blu), la curva di quinto grado ottenuta in questo caso (linea rossa) e il valore di freccia misurato in laboratorio (punto arancio).

Dal grafico si vede che la funzione polinomiale in questo caso si allontana di tanto dal valore misurato sulla trave, quindi si può affermare che questa rappresentazione non risulta attendibile. Infatti, l'errore tra il valore dato dal polinomio e il valore misurato in laboratorio in mezzeria risulta essere addirittura del 42.86%. Si può affermare, che nel caso in cui abbiamo i valori di curvatura sulla trave, il valore in mezzeria è fondamentale per una buona approssimazione.

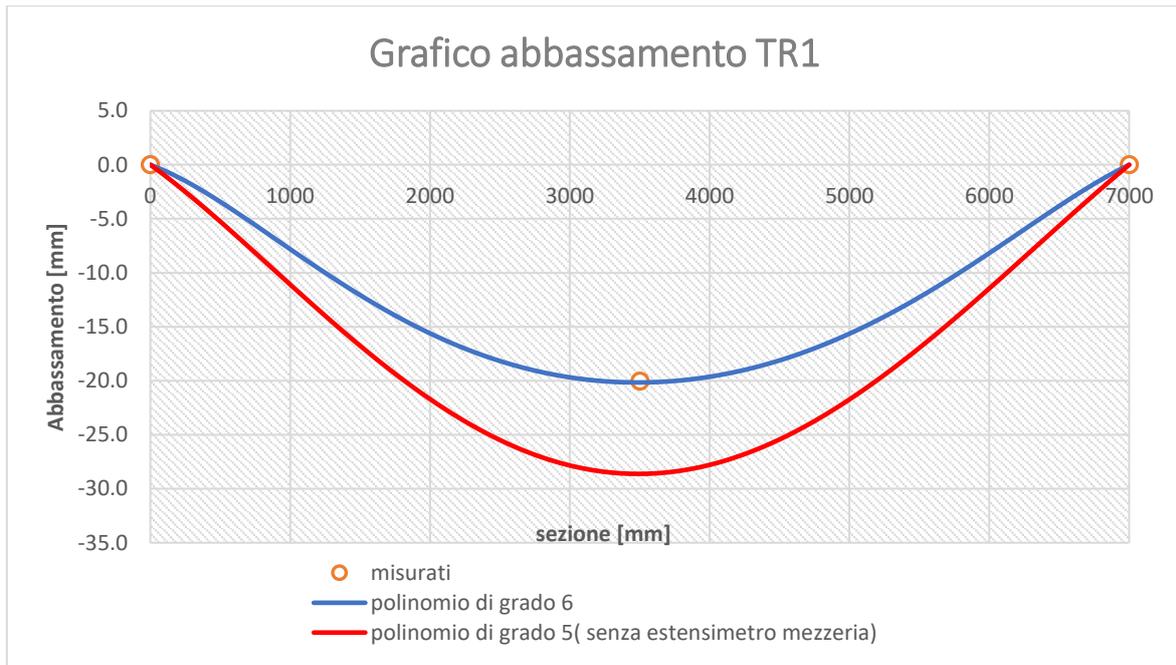


Figura 4.17: Confronto tra l'uso di un polinomio di sesto grado e uno di quinto grado (senza estensimetri in mezzeria) per la TR1

Per valutare l'importanza del valore di curvatura in mezzeria si è provato ad eliminare un'altra coppia di estensimetri e lasciare quella in mezzeria. Sono stati ricavati, ancora una volta, i coefficienti incogniti della funzione polinomiale e di conseguenza l'andamento punto per punto della funzione lungo la trave, come mostrato in **Figura 4.18**.

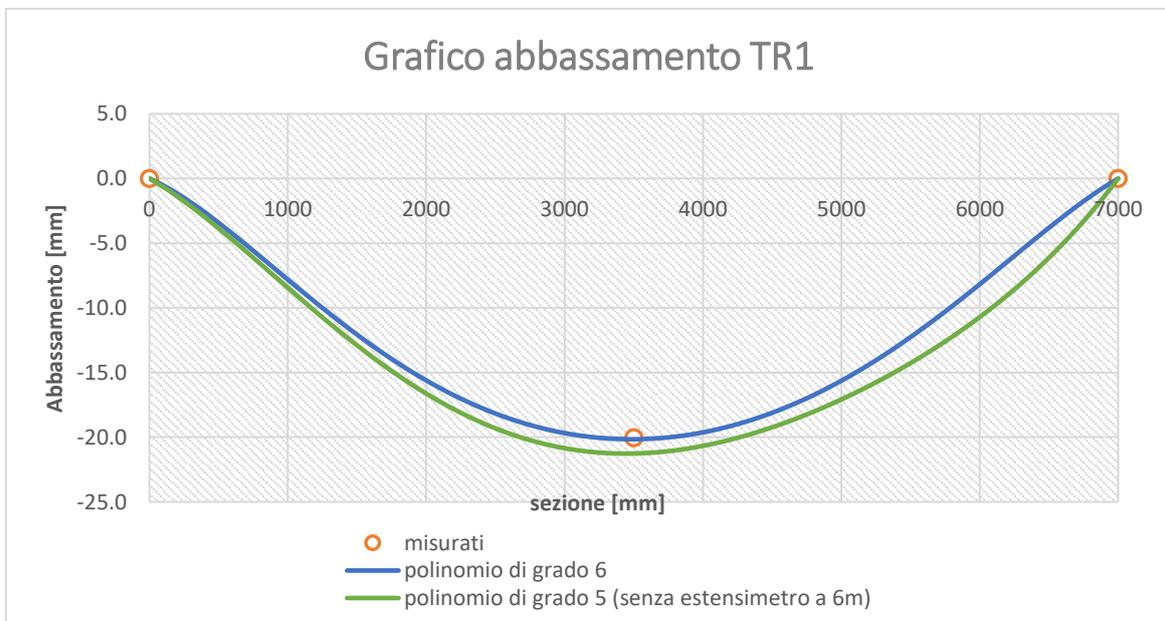


Figura 4.18: Confronto tra l'uso di un polinomio di sesto grado e uno di quinto grado (senza estensimetri a 6 m) per la TR1

Come si può vedere in mezzeria l'accuratezza migliora notevolmente e l'errore si attesta sul 6.13%, che ritorna ad essere un valore accettabile di errore. Allo stesso tempo, guardando la curva blu e verde, si nota come la curva verde, che rappresenta la funzione polinomiale senza la coppia di estensimetri ad un metro dall'appoggio destro, abbia un andamento diverso rispetto alla curva blu, che rappresenta la funzione polinomiale con tutte le coppie di estensimetri disponibili. Questo denota sempre una minore accuratezza dei risultati laddove viene eliminata la condizione al contorno.

Successivamente si è provato ad eliminare due coppie di sensori, andando ad eliminare le coppie più esterne, cioè quelle ad 1 m dagli appoggi. Procedendo come visto in precedenza, si ottengono i coefficienti incogniti del polinomio (**Tabella 4.14**) ottenendo questa volta una funzione del quarto ordine. Pertanto, si può ricostruire l'andamento della funzione polinomiale punto per punto per tutta la lunghezza della trave.

a	-2.22745E-14
b	3.09528E-10
c	3.9559E-07
d	-0.010295847
e	0

Tabella 4.14: Coefficienti incogniti per la TR1 senza gli estensimetri più esterni

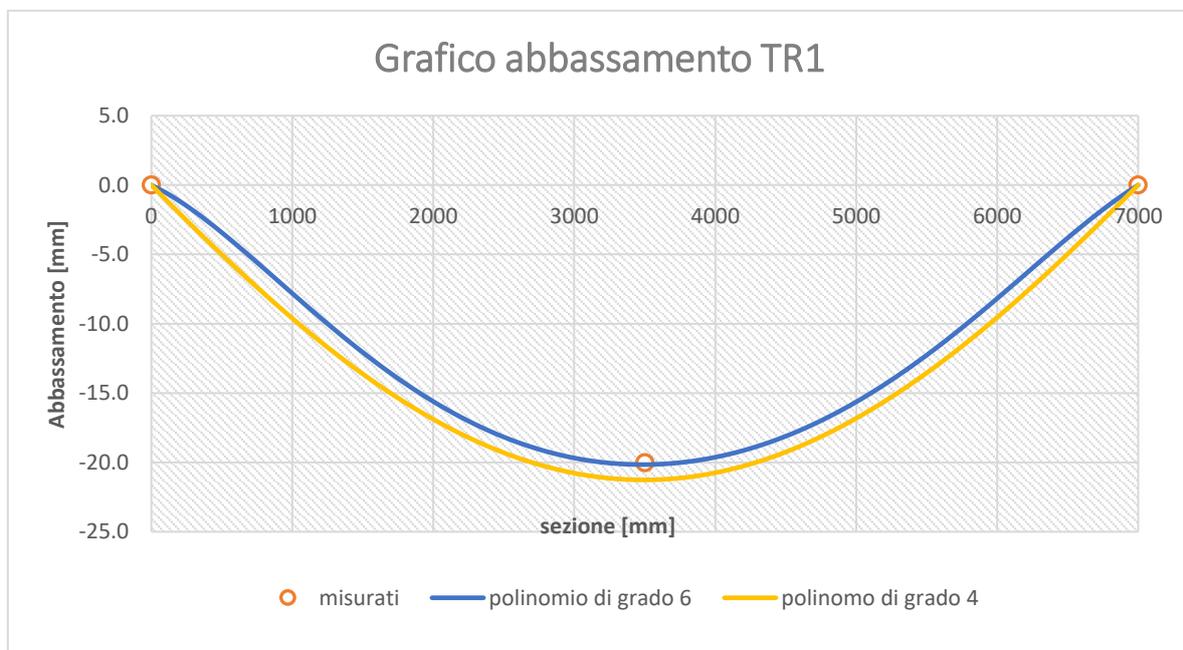


Figura 4.19: Confronto tra l'uso di un polinomio di sesto grado e uno di quarto grado (senza estensimetri più esterni) per la TR1

In **Figura 4.19** la curva blu rappresenta l'andamento della deformata con tutti i sensori funzionanti, mentre la curva gialla rappresenta l'andamento della deformata approssimato da un polinomio di quarto grado, cioè con solo tre coppie di sensori sulla trave. L'errore tra il valore in mezzzeria della funzione polinomiale di quarto grado e il valore di freccia misurato sulla trave risulta essere del 6.13%, quindi si può ritenere un valore accettabile anche questa volta.

Valutando tutti gli esempi sviluppati, possiamo concludere che se si vuole aumentare l'accuratezza del metodo polinomiale si devono installare il maggior numero di sensori a disposizione. Allo stesso tempo è la loro posizione ad influire sull'approssimazione della funzione a livello locale, in quanto si è visto che, ad esempio, eliminando il valore di curvatura in mezzzeria si aveva un errore molto grande in quel punto.

4.2 Valutazione della deformata dovuta alla flessione e al taglio tramite modelli semplificati

L'influenza della deformazione dovuta al taglio sul calcolo degli effetti del carico e sul calcolo dello spostamento verticale è quasi sempre trascurata. Però, in alcuni casi, questa influenza non è così piccola e bisogna tenerla bene in considerazione. Per alcune travi semplicemente appoggiate con sezione ad "I", con un rapporto luce-altezza utile vicino al dieci, questa deformazione di taglio può raggiungere il 25% dell'abbassamento totale.

Pertanto *Debernardi et al.* in [23, 24, 25] hanno messo a punto una procedura di calcolo semplice che permetta di determinare questo contributo e di non trascurarlo a priori, applicandola anche a delle travi studiate in laboratorio. La teoria sviluppata si basa sul modello a traliccio di Ritter-Morsch, che presente un corrente teso e uno compresso, degli elementi a traliccio di compressione e tensione nell'anima, costituiti rispettivamente da montanti di calcestruzzo inclinati a 45° e da staffe. Anche se l'angolo di 45° per gli elementi di calcestruzzo è un'ipotesi cautelativa, infatti, le regolamentazioni internazionali (Model Code 1990, Eurocodice 2, ACI 318-95M) consentono un'inclinazione θ che può variare fino alla metà del valore precedente, sulla base della teoria della plasticità.

Un altro importante miglioramento, basato sull'osservazione sperimentale, coinvolge l'introduzione di un termine correttivo, conosciuto come "contributo del calcestruzzo". Questo tiene in conto gli effetti favorevoli come, ad esempio, effetto interlock degli aggregati, effetto dowel e il contributo della zona compressa di calcestruzzo.

Oltre a queste caratteristiche, bisogna considerare anche le leggi costitutive del calcestruzzo fessurato nell'anima della trave. Questo viene affrontato con la teoria del campo di compressione modificata (MFCT), dove il calcestruzzo fessurato è considerato come un materiale nuovo con la propria resistenza e le caratteristiche di deformabilità, che sono formulate in termini medi.

L'abbassamento totale di una trave dipende da vari parametri, che possono essere divisi nelle seguenti categorie:

- Parametri geometrici: L, d, B, b_w, h_f
- Percentuale geometri di armatura longitudinale e trasversale: ρ_l, ρ_w
- Proprietà del materiale: f_{ck}, E_c , e il coefficiente di creep φ .

Questo può essere misurato considerando la seguente formula:

$$f_{total} = f_{bending} \left(1 + \frac{f_{shear}}{f_{bending}} \right) \quad (4.19)$$

L'analisi proposta da *Debernardi et al.* in [24] mostra che il rapporto L/d è considerevolmente importante, mentre il valore della campata L e il coefficiente di creep φ , sebbene siano significativi se riferiti alla deflessione totale, hanno un'influenza trascurabile su rapporto $f_{shear}/f_{bending}$.

Pertanto furono messe a punto due differenti procedure di calcolo. Una di tipo generale, basata sul modello misto³, per calcolare la deformazione media dovuta a taglio e flessione e il conseguente spostamento; però la soluzione risulta essere complicata, perché si ha bisogno di una procedura iterativa al computer. L'altro, invece, è un modello semplificato che permette la risoluzione del problema in forma chiusa, riducendo notevolmente la complessità.

Questa procedura permette di ricavare il contributo del taglio sull'abbassamento come funzione delle variabili L/d e b/b_w , considerando differenti rapporti di armatura longitudinale e resistenza del calcestruzzo.

Pertanto per gli schemi statici più comuni è stata determinata l'influenza percentuale del taglio sull'abbassamento a seconda dei valori di L/d e b/b_w , per una prefissata resistenza del calcestruzzo. Con questi valori *Debernardi et al.* hanno costruito un grafico che permette una risoluzione immediata e sommaria del problema (**Figura 4.20**).

³ L'analisi del comportamento della struttura avviene tenendo conto di due modelli, uno basato sul comportamento a traliccio della trave e lo smeared model.

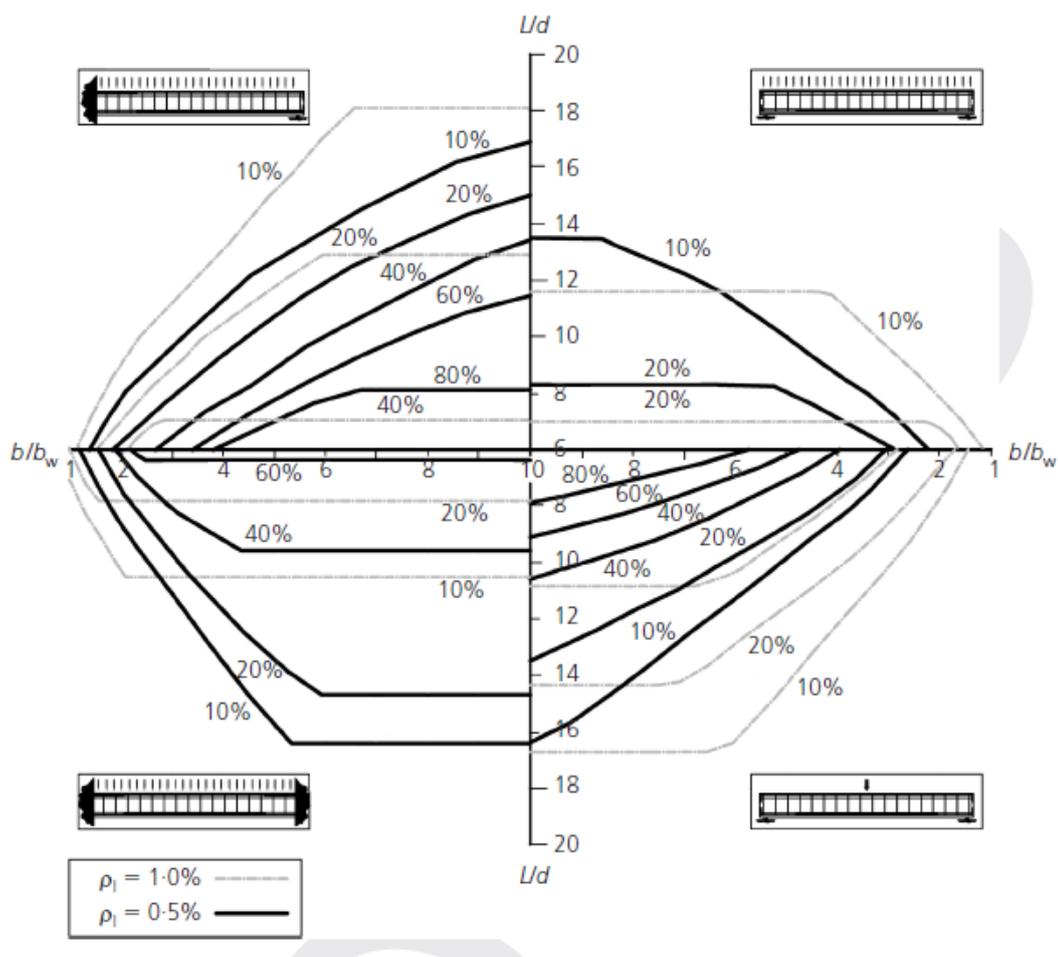


Figura 4.20: Influenza percentuale del taglio sulla deflessione in funzione dei rapporti L/d e b/b_w per diversi schemi statici ($f_{ck} = 30$ MPa)

Successivamente *Huang et al.* hanno proposto un metodo computazionale pratico per ricavare la deformazione dovuta al taglio per le travi in cemento armato, sviluppato attraverso un'analisi parametrica e un'analisi di regressione con l'aiuto di un modello FE. In primo luogo, viene effettuata una semplificazione della curva forza di taglio – deformazione a taglio ($V-\gamma$) basandosi sui risultati sperimentali e simulati. In secondo luogo, vengono eseguite molte analisi parametriche, basate sulle simulazioni FE, per valutare l'effetto di potenziali fattori sulla rigidità a taglio delle sezioni diagonalmente fessurate.

Per determinare l'abbassamento della trave dovuta al taglio e alla flessione *Huang et al.* in [29] hanno implementato un metodo che prevede una forma integrale, ma anche un metodo che permette il calcolo in forma chiusa.

Per la forma integrale si parte dalla determinazione della deformazione a taglio γ della sezione soggetta al momento M e al taglio V , attraverso i seguenti passaggi:

1. Calcolo del carico di cracking per flessione V_{mcr} :

$$V_{mcr} = \frac{M_{cr}}{M/V} \quad (4.20)$$

dove M e V sono il momento e il taglio agente sulla sezione e M_{cr} è il momento di cracking calcolato con la (4.21).

$$M_{cr} = \frac{f_t \cdot I_y}{y_t} \quad (4.21)$$

2. Calcolo del taglio di cracking V_{cr} attraverso la formula ricavata da *Debernardi et al.* in [25]:

$$V_{cr} = 0.15 \cdot \left(\frac{3 \cdot d}{M/V}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot \left(\frac{100 \cdot A_{st}}{b_w \cdot d} \cdot f_{ck}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \quad (4.22)$$

dove d è l'altezza utile della sezione, A_{st} è l'area dell'armatura tesa, f_{ck} è la resistenza a compressione cilindrica caratteristica del calcestruzzo.

3. Se il taglio V è più piccolo sia di V_{mcr} che di V_{cr} , allora γ si calcola nel seguente modo:

$$\gamma = \frac{k_v \cdot V}{G_c \cdot b_w \cdot h} \quad (4.23)$$

dove G_c è il modulo di taglio elastico del calcestruzzo e viene preso pari a $0.42 \cdot E_c$, b_w è la larghezza dell'anima, h è l'altezza della sezione e k_v è il coefficiente di taglio che vale 1 per le sezioni ad I o a T e 1.2 per le sezioni rettangolari.

4. Se il taglio V è più grande di V_{mcr} , ma più piccolo di V_{cr} , allora γ è calcolato secondo la seguente formulazione:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{k_v \cdot V}{G_c \cdot A_e} \\ A_e = A_g \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 + A_{cr} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] \leq A_g \end{array} \right. \quad (4.24)$$

dove A_e è l'area effettiva della sezione soggetta al momento M , A_{cr} è l'area della sezione fessurata.

5. Se il taglio V è più grande di V_{cr} , γ può essere calcolato nel seguente modo

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{k_v \cdot V_{cr}}{G_c \cdot A_e} + \frac{V - V_{cr}}{\beta \cdot G_c \cdot b_w \cdot h} \quad V_{cr} > V_{mcr} \\ \gamma = \frac{k_v \cdot V_{cr}}{G_c \cdot b_w \cdot h} + \frac{V - V_{cr}}{\beta \cdot G_c \cdot b_w \cdot h} \quad V_{cr} \leq V_{mcr} \end{array} \right. \quad (4.25)$$

dove

$$A_e = A_g \cdot \left(\frac{M_{cr}}{V_{cr} \cdot M/V}\right)^3 + A_{cr} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{V_{cr} \cdot M/V}\right)^3\right] \leq A_g \quad (4.26)$$

$$\begin{cases} \beta = 7.27 \cdot \rho_{st}^{0.24} \cdot \rho_{sw}^{0.72} \cdot \left(\frac{30}{f_c}\right)^{0.35} & M/Vh \leq 1 \\ \beta = \left(\frac{3}{M/Vh}\right)^{0.24} \cdot \rho_{st}^{0.30} \cdot \rho_{sw}^{0.32} \cdot \left(\frac{30}{f_c}\right)^{0.24} & M/Vh > 1 \end{cases} \quad (4.27)$$

In queste equazioni A_e rappresenta l'area effettiva e β è il fattore di riduzione.

Note tutte queste quantità è ora possibile calcolare la freccia dovuta al taglio δ_s , attraverso il principio dei lavori virtuali, con l'equazione seguente:

$$\delta_s = \int \gamma \cdot \bar{V} \cdot dx \quad (4.28)$$

dove \bar{V} è la forza di taglio agente sulla sezione data da una forza unitaria applicata nel punto dove si vuole calcolare la freccia.

Successivamente si è in grado di calcolare anche la freccia dovuta alla flessione δ_f , sfruttando la seguente equazione presa dal ACI 318-14 [30]:

$$\delta_f = \int \frac{M \cdot \bar{M}}{E_c \cdot I_e} \cdot dx \quad (4.29)$$

il termine I_e è il momento di inerzia effettivo, calcolato secondo l'equazione (4.30).

$$I_e = I_g \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m + I_{cr} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m\right] \quad (4.30)$$

dove I_g e I_{cr} sono, rispettivamente, i momenti d'inerzia della sezione non fessurata e della sezione fessurata, cioè della sezione in stadio I e in stadio II; \bar{M} è il momento agente sulla sezione risultante da un carico unitario applicato nel punto in cui viene calcolata la deflessione. L'esponente m nella (4.30) può essere uguale a 4 se si vuole produrre il momento d'inerzia effettivo su una particolare sezione trasversale oppure uguale a 3 se si vuole ottenere una rigidità media.

Questa procedura di calcolo, come si può notare, è molto laboriosa ed è necessario l'utilizzo di un computer per portare a termine i calcoli. Pertanto *Huang et al.* hanno sviluppato una procedura di calcolo in forma chiusa, che permette di calcolare l'abbassamento totale in un punto della trave in fase di progetto preliminare in modo rapido.

La **Figura 4.21** mostra la procedura di calcolo in forma chiusa per l'approssimazione della deflessione di una trave in cemento armato per le configurazioni di carico tipiche.

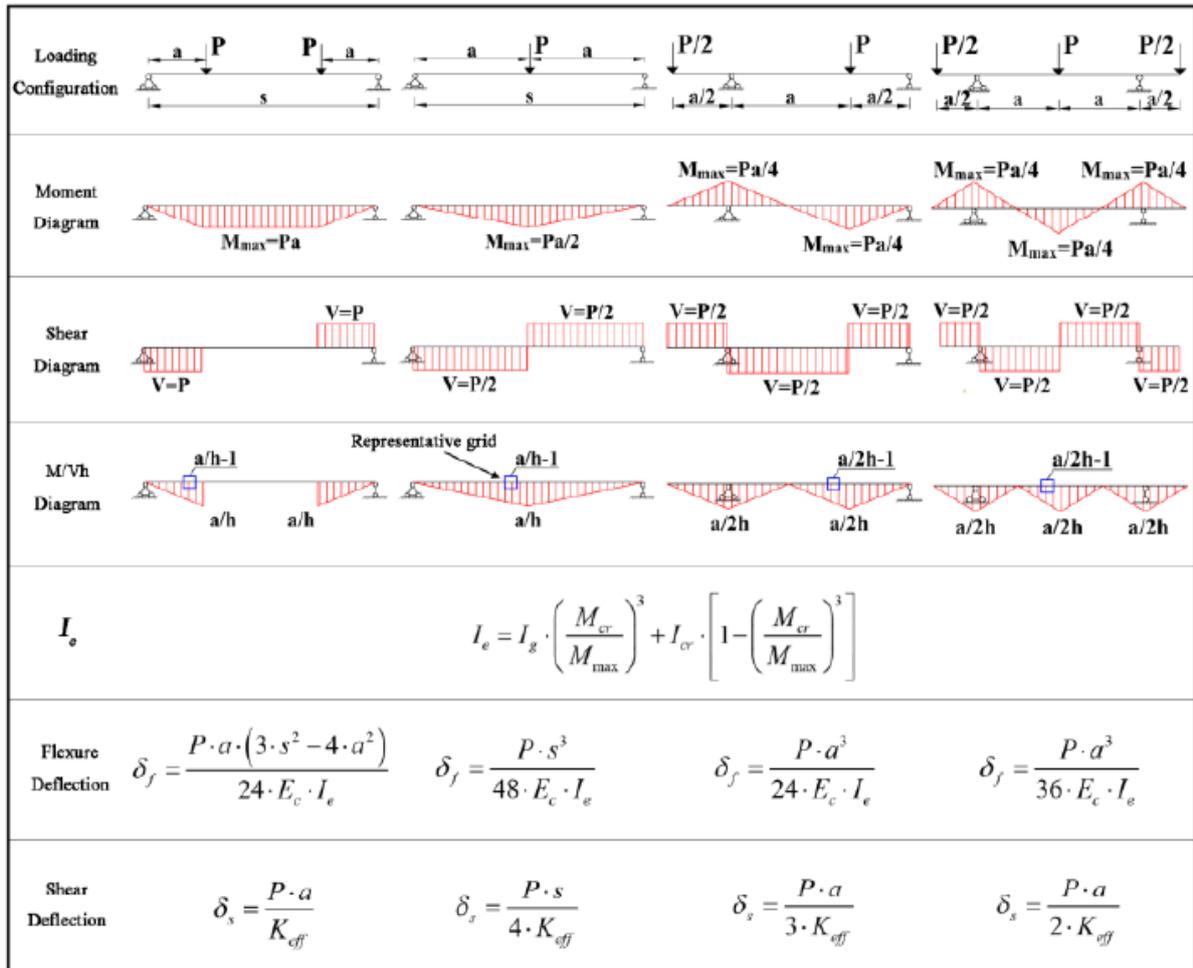


Figura 4.21: Espressioni in forma chiusa per approssimare l'abbassamento di una trave in cemento armato con le tipiche configurazioni di carico

Il momento d'inerzia effettivo I_e , in questo caso, viene considerato costante lungo tutta la trave e calcolato secondo la (4.30), prendendo come il momento pari a quello massimo. Inoltre l'esponente m viene preso uguale a 3 considerando una rigidità media sull'intera luce. L'influenza del taglio sulla deformazione a flessione è stata trascurata. Per semplificare i calcoli, inoltre, è stata trascurata anche la variazione di rigidità a taglio tramite il valore M/Vh . Il carico di rottura per taglio V_{cr} e l'effettiva rigidità a taglio K_{eff} sono stati calcolati per la sezione più rappresentativa e spalmati sull'intera luce. La rigidità a taglio effettiva viene ottenuta secondo la seguente formula:

$$K_{eff} = \frac{V}{\gamma} \quad (4.31)$$

dove γ è stimato secondo l'equazione (4.25).

4.2.1 Applicazioni

Analizzato il metodo precedente, si è provato ad applicare quanto visto alle travi viste in precedenza studiate da *Debernardi et al.* in [23, 24, 25] per valutare la capacità del metodo. Anche in questo caso vengono analizzate le travi TR1 e TR3, le cui caratteristiche geometriche e la geometria della sezione sono descritte nella **Tabella 4.8** e nelle **Figure 4.12**, rispettivamente. Per semplicità di calcolo si è deciso di applicare a queste travi il metodo in forma chiusa per avere un risultato preliminare da poter confrontare con i valori di freccia misurati in laboratorio.

Per la TR1 si è fatto riferimento alle formule presenti nella colonna più a sinistra della **Figura 4.21**. Questa è una trave semplicemente appoggiata con due carichi concentrati a distanza a uguale a 2500 mm dagli estremi e ha una lunghezza s pari a 7000 mm. Le caratteristiche del materiale sono presentate nella **Tabella 4.15**, calcolate secondo quanto riportato nel Model Code 2010 [30]. Mentre le quantità riguardanti la geometria della sezione e della trave sono presentate in **Tabella 4.16**.

Materiali			
Resistenza a compressione cilindrica cls	f_{cm}	30	MPa
Resistenza a compressione cilindrica cls caratteristica	f_{ck}	22	MPa
Resistenza a trazione del cls	f_t	2.36	MPa
Modulo di Young cls	E_c	30589	Mpa
Modulo di Young acciaio	E_s	200000	MPa

Tabella 4.15: Caratteristiche dei materiali per la TR1

Caratteristiche della trave			
Distanza carico dall'appoggio	a	2500	mm
Luce della trave	s	7000	mm
Carico concentrato	P	101.03	kN
Area intera sezione	A_g	135000	mm ²
Area armatura tesa	A_s	1005	mm ²
Area armatura compressa	A_s'	339	mm ²
Area sezione fessurata	A_{cr}	5.41E+04	mm ²
Momento d'inerzia intera sezione	I_g	8.15E+09	mm ³
Momento d'inerzia sezione fessurata	I_{cr}	1.49E+09	mm ³

Tabella 4.16: Caratteristiche geometriche della TR1

Note le quantità precedentemente descritte si procede nel calcolo del momento di fessurazione M_{cr} con la formula (4.21) e si ottiene:

$$M_{cr} = \frac{f_t \cdot I_y}{y_t} = 7.52 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (4.32)$$

Si calcola il momento massimo M_{max} :

$$M_{max} = P \cdot a = 2.53 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (4.33)$$

Conoscendo questi due valori è possibile calcolare il momento d'inerzia effettivo I_e , dato dalla formula (4.30) con esponente m pari a 3, per considerare una rigidità media su tutta la trave.

$$I_e = I_g \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 + I_{cr} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] = 1.66 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \quad (4.34)$$

Adesso è possibile calcolare la freccia in mezzera dovuta alla flessione attraverso la seguente formulazione, ricavata dalla **Figura 4.21**:

$$\delta_f = \frac{P \cdot a \cdot (3 \cdot s^2 - 4 \cdot a^2)}{24 \cdot E_c \cdot I_e} = 25.24 \text{ mm} \quad (4.35)$$

Una volta nota la freccia dovuta alla flessione, si calcola la quota parte di freccia da attribuire al taglio facendo sempre riferimento alla formula in forma chiusa fornita, per il nostro particolare schema statico, dalla **Figura 4.21**; ottenendo l'equazione (4.36). Tutte le quantità necessarie per la risoluzione della suddetta equazione sono riassunte nella **Tabella 4.17**.

Quantità per determinare la freccia dovuta al taglio			
Carico di fessurazione a flessione	V_{mcr}	3.01E+04	N
Carico di fessurazione a taglio	V_{cr}	3.98E+04	N
Taglio	V	1.01E+05	N
Fattore di riduzione del taglio	β	0.0551	[-]
Area effettiva	A_e	8.92E+04	mm ²
Coefficiente di taglio	k_v	1	[-]
Modulo elastico a taglio del cls	G_c	12847	MPa
Deformazione di taglio	γ	1.48E-03	[-]
Rigidità a taglio effettiva	K_{eff}	6.84E+07	N

Tabella 4.17: Quantità per ricavare la freccia dovuta al taglio per la TR1

$$\delta_s = \frac{P \cdot a}{K_{eff}} = 3.69 \text{ mm} \quad (4.36)$$

Pertanto la freccia totale risulta essere la seguente:

$$\delta_t = \delta_f + \delta_s = 28.93 \text{ mm} \quad (4.37)$$

Confrontando quest'ultimo con il valore misurato in laboratorio di 20.033 mm, si nota una forte difformità. Infatti, l'errore risulta essere del 44.41%, quindi non del trascurabile. Però, allo stesso modo, non si deve dimenticare che la procedura di calcolo in forma chiusa, come specificato dagli autori *Huang et al.*, è stata sviluppata per dare un risultato in fase preliminare, cioè serve al progettista per avere un quadro immediato della situazione, che successivamente dovrà essere approfondito ulteriormente.

Adesso viene analizzata la trave TR3 prendendo in considerazione la seconda colonna a partire da sinistra della **Figura 4.21**, dove sono presenti tutte le formule che ci permettono di ricavare la freccia in mezzeria e confrontarla con quella misurata in laboratorio.

La TR3 risulta essere una trave semplicemente appoggiata soggetta a un carico in mezzeria con a uguale a 3000 mm e la luce s pari a 6000 mm. Le caratteristiche dei materiali che compongono la trave in esame, calcolate secondo le formule del FIB Model Code 2010 [30], e quelle relative alla geometria sono raggruppate, rispettivamente, nella **Tabella 4.18** e nella **Tabella 4.19**.

Queste quantità permettono di definire l'abbassamento imputabile alla flessione seguendo la stessa procedura vista per la trave TR1 analizzata in precedenza.

Materiali			
Resistenza a compressione cilindrica cls	f_{cm}	28	MPa
Resistenza a compressione cilindrica cls caratteristica	f_{ck}	20	MPa
Resistenza a trazione del cls	f_t	2.21	MPa
Modulo di Young cls	E_c	29962	Mpa
Modulo di Young acciaio	E_s	200000	MPa

Tabella 4.18: Caratteristiche dei materiali per la TR3

Caratteristiche della trave			
Distanza carico dall'appoggio	a	3000	mm
Luce della trave	s	6000	mm
Carico concentrato	P	100.00	kN
Area intera sezione	A _g	135000	mm ²
Area armatura tesa	A _s	1005	mm ²
Area armatura compressa	A _s '	339	mm ²
Area sezione fessurata	A _{cr}	5.43E+04	mm ²
Momento d'inerzia intera sezione	I _g	8.16E+09	mm ³
Momento d'inerzia sezione fessurata	I _{cr}	1.51E+09	mm ³

Tabella 4.19: Caratteristiche geometriche della TR3

Si calcola, ora, il momento di fessurazione M_{cr} con l'equazione (4.21) e il momento massimo M_{max} :

$$M_{cr} = \frac{f_t \cdot I_y}{y_t} = 7.07 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (4.39)$$

$$M_{max} = \frac{P \cdot a}{2} = 1.5 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (4.38)$$

Note queste quantità è possibile calcolare il momento d'inerzia effettivo, facendo riferimento alla formula (4.30), dove l'esponente m viene preso pari a 3 per considerare una rigidità media su tutta la trave.

$$I_e = I_g \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 + I_{cr} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] = 2.21 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \quad (4.40)$$

Nella **Figura 4.21** viene fornita la formula per determinare la freccia dovuta alla flessione e si ottiene il seguente risultato:

$$\delta_f = \frac{P \cdot s^3}{48 \cdot E_c \cdot I_e} = 6.79 \text{ mm} \quad (4.41)$$

Passando al calcolo della freccia in mezzzeria dovuta al taglio, le quantità necessarie alla sua determinazione sono raggruppate nella **Tabella 4.20**. La formulazione in forma chiusa della freccia dovuta al taglio per lo schema statico della trave TR3 è presente in **Figura 4.21** e viene calcolata nell'equazione (4.42).

Quantità per determinare la freccia dovuta al taglio			
Carico di fessurazione a flessione	V_{mcr}	2.95E+04	N
Carico di fessurazione a taglio	V_{cr}	3.91E+04	N
Taglio	V	50000	N
Fattore di riduzione del taglio	β	0.0569	[-]
Area effettiva	A_e	8.90E+04	mm ²
Coefficiente di taglio	k_v	1	[-]
Modulo elastico a taglio del cls	G_c	12584	MPa
Deformazione di taglio	γ	2.90E-04	[-]
Rigidezza a taglio effettiva	K_{eff}	1.73E+08	N

Tabella 4.20: Quantità per ricavare la freccia dovuta al taglio per la TR3

$$\delta_s = \frac{P \cdot s}{4 \cdot K_{eff}} = 0.87 \text{ mm} \quad (4.42)$$

Quindi la freccia totale sarà:

$$\delta_t = \delta_f + \delta_s = 7.66 \text{ mm} \quad (4.43)$$

Confrontando quest'ultimo con il valore misurato in laboratorio di 13.8 mm si ha un errore del -44.47%, che rispetto al caso precedente risulta essere più contenuto, ma comunque abbastanza alto. Come detto nel caso precedente, questa procedura di calcolo in forma chiusa ha l'obiettivo di restituire un valore preliminare, che serve al progettista per porre le basi della progettazione. Pertanto questo valore può essere ritenuto accettabile nella progettazione preliminare.

Inoltre, si è provato a modificare il valore del carico e i risultati ottenuti mostrano un errore compreso tra il 11% e il 76% rispetto a quello misurato in laboratorio, come mostrato nella **Tabella 4.21** e **4.22**, rispettivamente per la trave TR1 e per la trave TR3. Mentre nella **Figura 4.22** e **4.23** viene rappresentato il grafico Carico – Freccia sia per i valori ricavati con il metodo precedentemente descritto sia per i valori misurati in laboratorio per entrambe le travi.

Pertanto si può concludere che è un metodo valido solo per una progettazione di massima, utile al progettista per fare un quadro generale della situazione.

Carico P [kN]	$\delta_{misurato}$ [mm]	δ_t [mm]	Errore [%]
30.50	5.400	1.652	-69.40
51.56	9.449	8.399	-11.11
78.93	15.268	20.058	31.37
101.03	20.033	28.93	44.41
155.73	31.581	49.006	55.17

Tabella 4.21: Valori di abbassamento misurati e calcolati e relativi errori per la TR1

Carico P [kN]	δ_{misurato} [mm]	δ_t [mm]	Errore [%]
52.10	5.400	1.285	-76.21
83.90	10.720	4.985	-53.50
100.00	13.800	7.663	-44.47
124.60	18.700	11.71	-37.36
165.00	26.400	17.987	-31.87

Tabella 4.22: Valori di abbassamento misurati e calcolati e relativi errori per la TR3

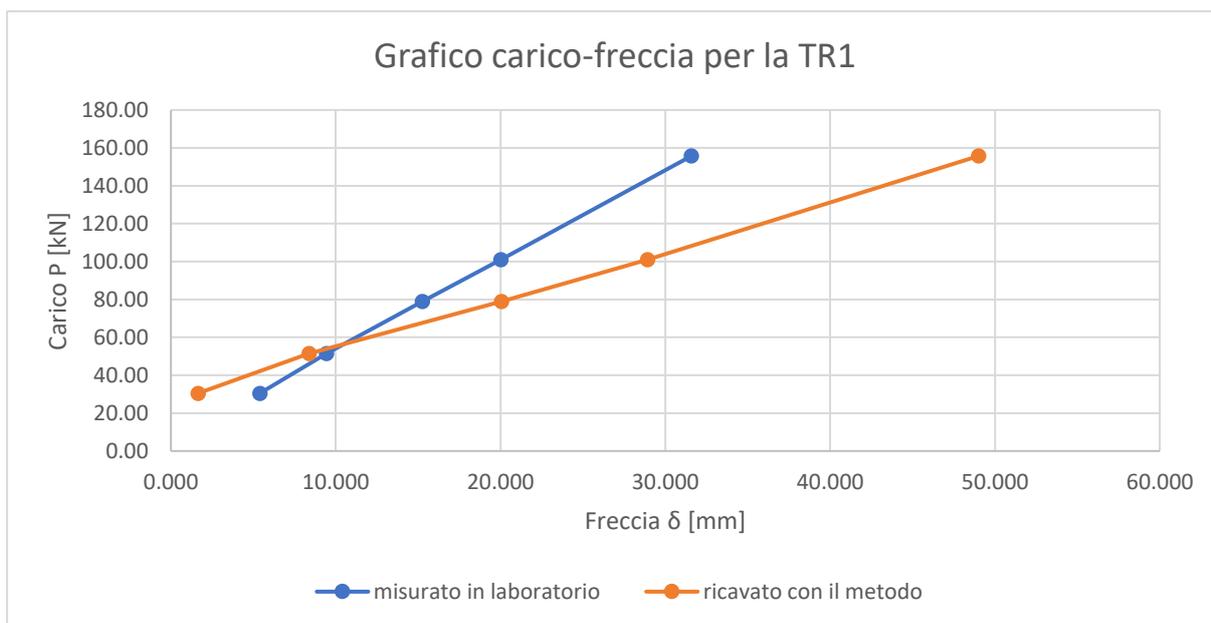


Figura 4.22: Grafico carico – freccia per la trave TR1

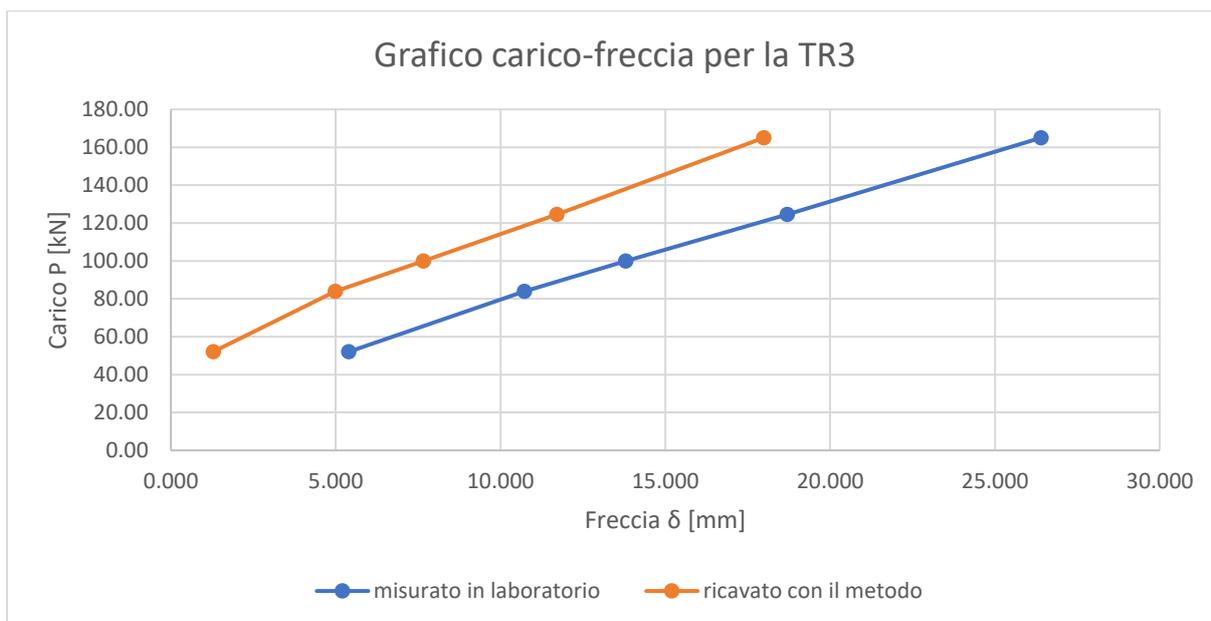


Figura 4.23: Grafico carico – freccia per la trave TR3

5 CASO STUDIO DELLA METODOLOGIA CON ELEMENTI LOW-COST

5.1 Sysdev SHBOX

SYSDEV è una start-up proveniente dal Politecnico di Torino che progetta e realizza soluzioni innovative per il monitoraggio strutturale e ambientale di edifici e infrastrutture come ponti e gallerie, per la gestione di grandi edifici e smart city, con lo scopo di migliorare il controllo del territorio e la sua resilienza a fronte di eventi catastrofici, cioè della capacità di un'opera di tornare funzionale a seguito di un evento critico.

Una delle soluzioni sviluppate da Sysdev è SHBox, una sorta di scatola nera delle infrastrutture. Dotata di nodi multi-sensore wireless e di un'infrastruttura di rete basata sul protocollo LoRaWAN, SHBox trova applicazione nel monitoraggio di edifici e infrastrutture e consente una valutazione a distanza dello stato di salute di una struttura, ma anche di ricostruire nel tempo la storia dell'opera monitorata.

Questa soluzione prevede l'impiego di:

- **Nodi multi-sensore** basati sul protocollo LoRaWAN;
- **Infrastruttura di rete** per la raccolta dei dati trasmessi dai nodi multi-sensore e per l'invio su server centrale;
- **Piattaforma software** per l'elaborazione, archiviazione e visualizzazione dei dati.

Vista la situazione delle infrastrutture in Italia, ma anche in altri Paesi, l'impiego di questo sistema offre soluzioni all'avanguardia, efficaci, economiche e applicabili su larga scala. Infatti, i sistemi di monitoraggio strutturale (SHM) tradizionali sono limitati a strutture di una certa importanza a causa della complessità e dei costi di installazione. Il sistema SHBox, attraverso l'applicazione del paradigma IoT (Internet of Things) e l'analisi dei Big Data ricavati, apre una nuova strada per l'applicazione massiva e distribuita a tutte le strutture e infrastrutture esistenti del monitoraggio strutturale e del rilevamento delle anomalie. Pertanto i vantaggi nell'uso di questo sistema sono dovuti alle seguenti caratteristiche:

- Alta integrazione nei materiali e nell'ambiente;
- Facile installazione, gli SHBox sono installati semplicemente pulendo la superficie di installazione e incollaggio attraverso adesivo strutturale acrilico;
- Dimensione ridotta;

- Basso costo, vengono venduti in comodato d'uso con canoni annui dell'ordine delle centinaia di euro, fornendo anche l'accesso alla piattaforma e al software per interpretare i dati;
- Connessione automatica alla rete tramite wireless a lungo raggio attraverso gli standard LoRa, che permettono un range di trasmissione fino a 15 km in campo libero e fino a 2 km in aree urbane;
- Batterie integrate con minimo consumo di energia.

5.1.1 I nodi multi-sensore

SYSDEV propone tre classi di nodi multi-sensore:

- **Nodi multi-sensore di spostamento** – misurano nello stesso momento e nello stesso punto: spostamenti, inclinazioni, accelerazioni, eventi sismici e temperatura.
- **Nodi multi-sensore di deformazione** – misurano nello stesso momento e nello stesso punto: spostamenti, inclinazioni, accelerazioni, eventi sismici e temperatura.
- **Nodi multi-sensore del potenziale galvanico** – misurano nello stesso momento e nello stesso punto: il potenziale galvanico dell'armatura rispetto ad un elettrodo di riferimento Ag/AgCl, inclinazioni, accelerazioni, eventi sismici e temperatura.



Figura 5.1: Da sinistra a destra: nodo multi-sensore di spostamento, nodo multi-sensore di deformazione, nodo multi-sensore del potenziale galvanico

Tutti i sensori hanno in comune la misura di temperatura, come dato secondario, per cui non generano eventi sulla temperatura, ma correlano alle altre misure, la temperatura alla quale sono state effettuate.

Un'altra caratteristica comune ai tre tipi di sensore è la misura dell'inclinazione. Questa viene effettuata attraverso un inclinometro auto-allineante secondo la verticale terrestre, con un grado di risoluzione di 0.05° . Questo sensore fornisce la misura dell'inclinazione rispetto alla verticale terrestre e anche la sua direzione nello spazio.

Infine, tutti i sensori sono dotati di sismografo, che misura l'onda sismica o un'onda assimilabile ad essa della durata di almeno 4 secondi e con un andamento ondulatorio. Quando viene captato un segnale di questo tipo, il sensore inizia a registrare con un buffering fino a 180 secondi, campionando l'accelerazione sui tre assi e contemporaneamente viene fatto un campionamento ad alta frequenza (125 Hz) dello strain, memorizzando il valore massimo raggiunto, sia positivo che negativo. Inoltre, al termine dell'evento sismico, viene fatta una lettura finale di strain e temperatura, per verificare gli effetti del sisma sulla struttura monitorata. I parametri di output sono i seguenti:

- Durata dell'evento sismico, espressa in secondi;
- Frequenza media dell'evento sismico per ogni asse (X-Y-Z), espressa in Hz;
- Accelerazione di picco (positiva e negativa) registrata durante l'evento sismico per ogni asse (X-Y-Z), espressa in mG;
- Spostamento di picco (positivo e negativo) registrato durante l'evento sismico per ogni asse (X-Y-Z).

I nodi multi-sensore rappresentano gli elementi atomici del sistema. Essi sono assimilabili ad una nuvola di punti di misura dinamici che aggiornano costantemente il modello digitale strutturale su di essi costruito e interpolato. Tale logica di posizionamento è possibile solo grazie alle caratteristiche peculiari dei nodi multi-sensore (basso, costo, semplicità di installazione, assenza di cablaggio, garanzia di trasmissione dati). Ciò consente una visione complessiva ad elevata granularità e definizione, in linea generale eliminando la necessità di analisi a posteriori che richiedono modelli strutturali dinamici estremamente raffinati interpretativi delle misure sperimentali. La soluzione proposta consente una riduzione del numero di ispezioni visive limitandole ai casi più critici segnalati dal sistema.

La ridondanza di nodi multi-sensore non costituisce una duplicazione, ma un aumento della risoluzione e dell'informazione. È perciò possibile e utile dispiegare più nodi su uno stesso elemento strutturale, per poterlo descrivere meglio. Ad esempio, una trave molto lunga può assumere un profilo non simmetrico se sottoposta a carico: in tal caso dispiegare più nodi multi-sensore lungo tutta la trave permette di ricostruirne il profilo, invece che la semplice deformazione media.

Nel sistema proposto, la costruzione del DIGITAL TWIN non si limita al semplice dispiegamento dei nodi multi-sensore, ma si esplicita nella ricombinazione virtuale e a posteriori delle informazioni tramite la piattaforma software (BIG DATA fisici). La modalità

operativa proposta è quella dell'aggregazione crescente delle informazioni, al fine di costruire il modello digitale dinamico (perché reattivo ai cambiamenti della struttura monitorata).

SHBox® è in grado di attivare automaticamente opportuni segnali di attenzione in caso di superamento dei valori di soglia delle grandezze misurate dai nodi multi-sensore. Tali informazioni vengono rese disponibili tramite la piattaforma software allo strutturista/tecnico incaricato della gestione delle strutture al quale spetta il compito di valutare lo stato di salute dell'opera.

SYSDEV propone un completo sistema di lettura e acquisizione di parametri fisici, che vengono forniti all'utilizzatore come dati filtrati ed aggregati tramite librerie di algoritmi che ne permettono un immediato impiego. Ogni nodo multi-sensore implementa un transceiver LoRa, con relativo protocollo LoRaWAN. I nodi multi-sensore possono perciò connettersi sia alle reti LoRa Sysdev, sia in ROAMING a reti pubbliche LoRa. In entrambi i casi sono gestiti direttamente dalla piattaforma software proposta da SYSDEV.

La soluzione proposta è a basso consumo energetico, i nodi multi-sensore sono alimentati con batterie a durata pluriennale. Pertanto risulta molto semplice installarli, in quanto non necessitano di alcuna alimentazione, e mantenerli, perché il cambio batteria deve essere effettuato a distanza di anni.

Per massimizzare la durata delle batterie ed evitare il sovraccarico della rete dati, i nodi multi-sensore operano secondo una logica ad eventi. Ogni sensore, pur effettuando una misura continuativa della struttura su cui è applicato, trasmette autonomamente un nuovo dato solo quando verifica che il nuovo valore si è discostato significativamente da quello precedente. In assenza di eventi viene comunque trasmesso un messaggio a periodi configurabili di 6 - 12 - 24 ore (funzione data logger).

Prima di procedere con l'installazione dei nodi, il professionista incaricato è chiamato a predisporre un "Piano di dispiegamento". Si tratta di un documento nel quale viene analizzata la struttura e viene definita la posizione di ogni nodo multi-sensore (in coordinate CAD 3D, se disponibile il relativo modello). Tale piano di dispiegamento verrà utilizzato successivamente dagli installatori per la corretta installazione dei nodi e dal professionista per la configurazione iniziale del sistema una volta attivato.

La procedura di installazione dei nodi multi-sensore di spostamento e di deformazione richiede all'incirca 15 minuti (inclusi i tempi morti). Per quanto riguarda i nodi di misura del potenziale

galvanico, i tempi di intervento sono stimati in circa 30/40 minuti. La procedura di installazione si articola in 4 fasi:

- **Fase 1:** preparazione del substrato;
- **Fase 2** (solo per i nodi di misura del potenziale galvanico): saldatura del cavo elettrico alle armature, creazione del foro per l'alloggiamento dell'elettrodo di riferimento, tamponamento dell'elettrodo nel foro con malta per anodi;
- **Fase 3:** inserimento della batteria nel sensore;
- **Fase 4:** incollaggio del sensore con adesivo strutturale acrilico.

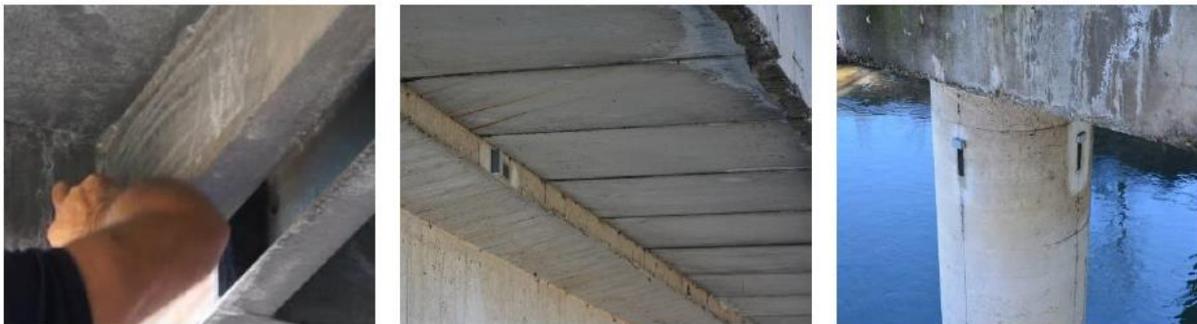


Figura 5.2: Fasi installazione

Terminata la verifica dell'installazione, i sensori saranno pronti ad operare senza alcun ulteriore intervento in loco.

I data sheet sui tre tipi di nodi multi-sensore sono consultabili nell'**Appendice A**.

5.1.2 Infrastruttura di rete

L'infrastruttura di rete rappresenta il canale di comunicazione tra i nodi multi-sensore e la piattaforma software ed è costituita da gateway (access point di rete) di nuova generazione. I gateway comunicano con i nodi multi-sensore attraverso lo standard LoRa e con la piattaforma software via 3G/4G, rete ETHERNET fisica. Il gateway può essere collegato anche a dorsali in fibra ottica se disponibili localmente (**Figura 5.3 e 5.4**).



Figura 5.3: Gateway di trasmissione dati con pannello fotovoltaico per energia solare



Figura 5.4: Installazione tipica del gateway LoRa

LoRa è il sistema dati wireless di riferimento per le applicazioni IoT. Le unità LoRa sono in grado di ricevere messaggi fino a 20dB al di sotto della soglia del rumore. Questo si traduce in un raggio operativo, centrato su ogni singolo gateway, di max. 2000 metri in ambiente urbano e di max. 15000 metri in area aperta. I gateway LoRa coesistono senza problemi con ripetitori di telefonia cellulare e trasmettono con una potenza molto bassa (25mW), 4 volte inferiore a quella di un ACCESS POINT Wi-Fi: non creano quindi alcun problema in termini di inquinamento elettromagnetico. Un singolo gateway LoRa può gestire fino a 65000 sensori.

Un parametro molto importante per questo sistema è l'altezza dell'antenna. Infatti, più è alta l'antenna più è ampia la zona coperta dal gateway. Ad esempio, con un solo gateway si

potrebbe coprire senza alcun problema un'intera tratta stradale andando ad intercettare più viadotti.

L'architettura del sistema LoRa Sysdev completo viene mostrata nella **Figura 5.5**.

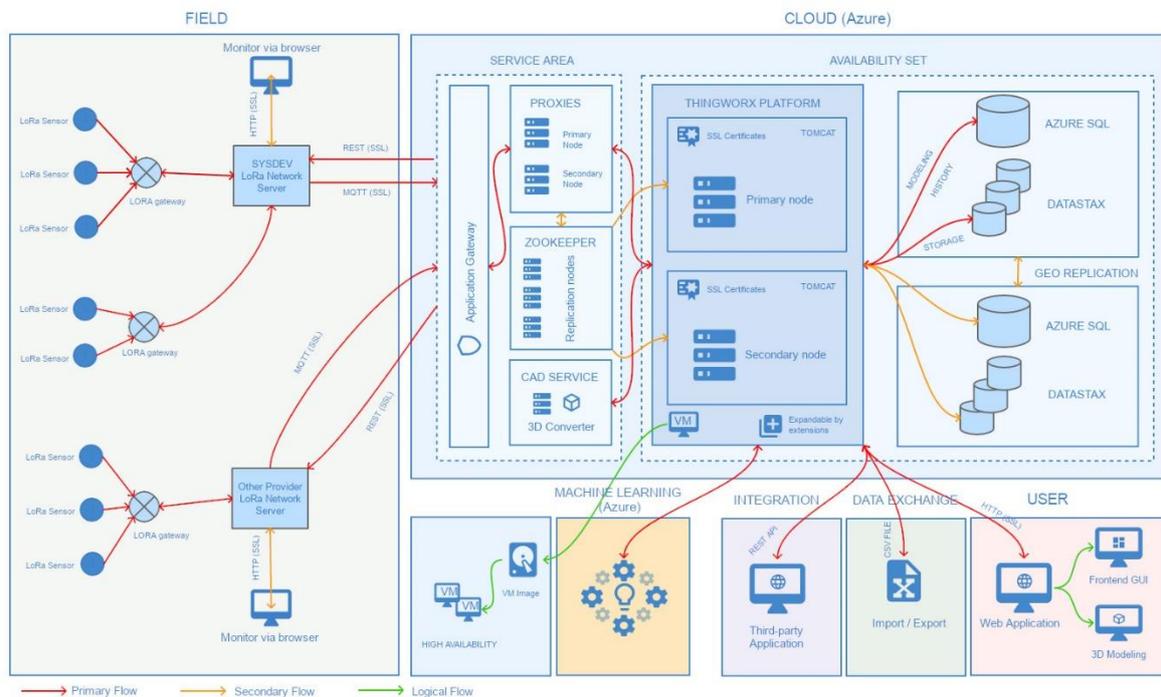


Figura 5.5: Architettura sistema LoRa Sysdev

Il data sheet del gateway LoRa è consultabile nell'**Appendice A**.

5.1.3 La piattaforma software

La piattaforma software, accessibile da browser, è il luogo dove viene generato il gemello digitale della realtà fisica misurata dai nodi multi-sensore. La piattaforma è anche il controllore centrale della rete LoRa di raccolta dati. È possibile sia verificare e cambiare i parametri operativi dei singoli settori di rete (serviti dai gateway) sia interagire direttamente con il singolo nodo (**Figura 5.6**). I dati provenienti dai nodi multi-sensore possono essere valutati singolarmente o riaggregati dinamicamente tramite modelli fisici e statistici interpretativi.

All'interno della piattaforma si forma il valore d'uso per l'utente finale, che può accedere ai dati e alle relative elaborazioni semplicemente connettendosi al sistema dal browser con qualunque tipo di dispositivo. I dati dei singoli nodi multi-sensore, non solo possono essere valutati singolarmente, ma possono essere riaggregati dinamicamente tramite modelli fisici interpretativi (**Figura 5.7**). Questi ultimi devono essere in ultima istanza definiti dall'utente

stesso in funzione degli obiettivi di indagine, tipologie, ecc. Tuttavia nell'ambito della catena di acquisizione vengono fornite librerie di algoritmi di aggregazione di immediato impiego.

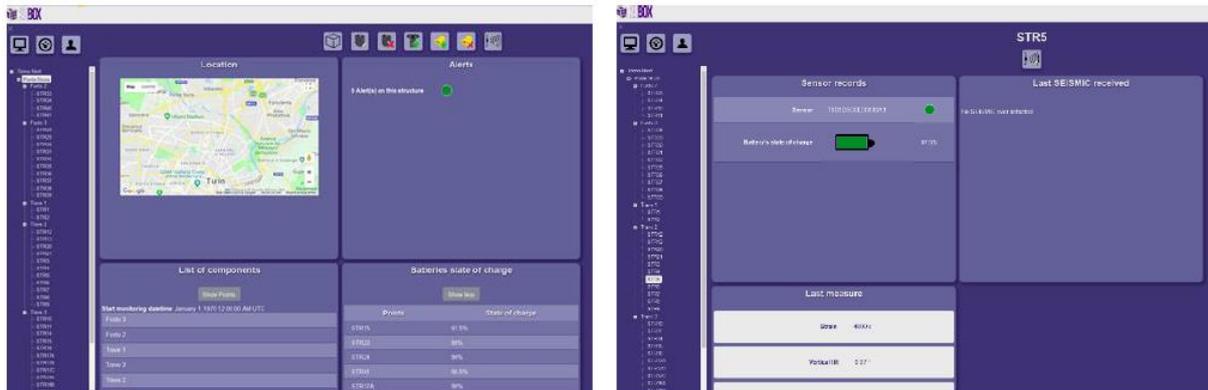


Figura 5.6: Grafica del software

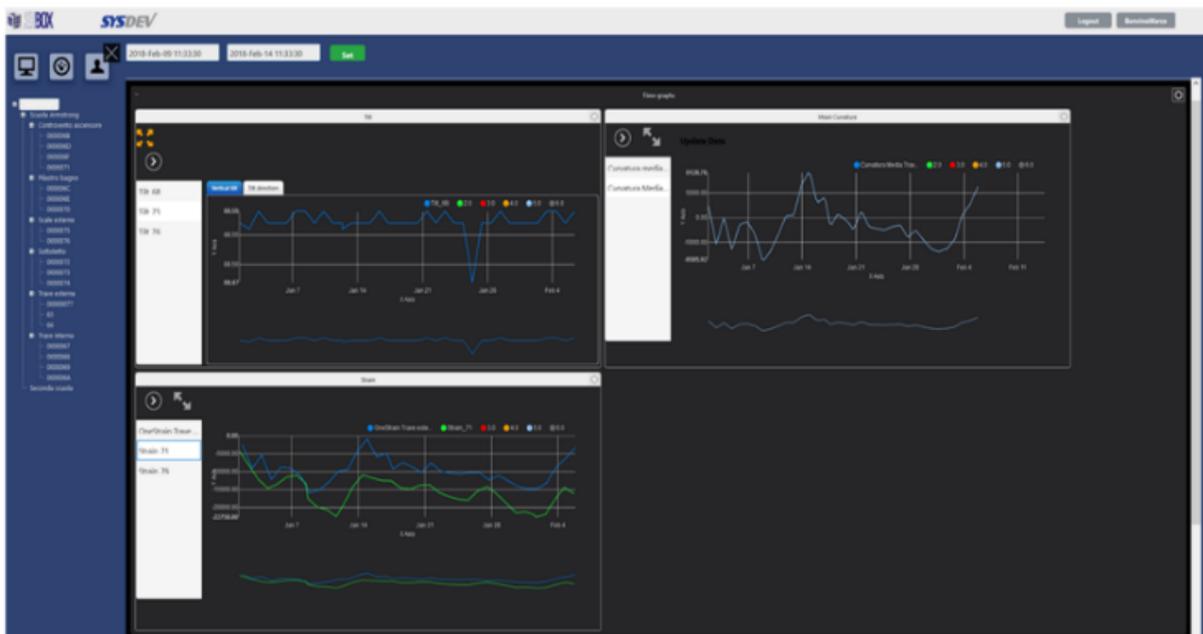


Figura 5.7: Visualizzazione dei grafici per i parametri monitorati

La piattaforma implementa la visualizzazione e navigazione tridimensionale della struttura in modo tale da offrire un approccio visivo globale equivalente a quello di una vista sul campo. Il CAD 3D della struttura, caricato nel sistema, viene reso disponibile e navigabile direttamente da browser. Durante la navigazione virtuale, ogni volta che ci si avvicinerà ad un elemento strutturale monitorato, si vedrà assumere a quest'ultimo un colore diverso, cioè verde, giallo o rosso, a seconda delle condizioni di salute dell'elemento monitorato (Figura 5.8). Il colore è rappresentativo di eventuali superamenti di soglia per i parametri misurati o alla presenza di valori anomali. Per ognuno di tali elementi strutturali il professionista potrà richiamare, su finestra flottante nello spazio virtuale, i valori salienti in forma grafica e numerica. In tal modo

si fornisce al professionista la percezione dello stato globale della struttura, in forma intuitiva e immediata.



Figura 5.8: Esempio di visualizzazione CAD 3D per gli elementi monitorati

Una delle peculiarità del sistema proposto da Sysdev riguarda la possibilità di ricostruire nel tempo l'andamento strutturale dell'opera. SHBox garantisce la memorizzazione storica di ogni dato rilevato e permette di applicare i criteri di visualizzazione ed analisi non solo allo stato corrente, ma anche al passato. I dati richiamati dall'archivio storico per un certo periodo permettono non solo di verificare direttamente l'andamento della struttura e dei suoi elementi nel tempo, ma anche di utilizzare la valutazione automatica.

È infatti possibile sottoporre la struttura all'analisi automatica per un determinato periodo di tempo nel passato, per verificare ad esempio se un certo grado di anomalia si è già presentato, magari in coincidenza di eventi esterni (sisma, ecc.).

La piattaforma software è in grado di interagire con i sistemi BIM (Building Information Model):

- Il modello BIM potrà essere importato per la visualizzazione 3D dello stato delle strutture;
- I dati provenienti dai nodi multi-sensore potranno essere visualizzati direttamente sul BIM;
- L'ambiente BIM (ad es. Revit) potrà essere utilizzato per la redazione del piano di dispiegamento dei sensori con trasmissione automatica delle informazioni alla piattaforma software.

Il sistema proposto da Sysdev è altamente scalabile in quanto:

- a livello applicativo la piattaforma software (previa configurazione) è in grado di gestire i dati provenienti da un numero elevato e variegato di sensori.

- A livello di comunicazione, l'infrastruttura di rete basata sullo standard LoRa è in grado di gestire qualsiasi sensore che implementa il protocollo LoRaWAN. La rete è costituita da gateway con un raggio di 2000 m al massimo in ambiente urbano e di 15000 m al massimo in area aperta. Un singolo gateway LoRa può gestire fino a 65000 sensori.

La piattaforma software è sviluppata su framework e piattaforme di grado industriale ed è implementata su un'architettura scalabile e ridondata, in grado di garantire:

- Massima affidabilità nella conservazione dei dati storici delle strutture;
- Completa continuità di servizio, anche a fronte di interventi periodici di manutenzione e aggiornamento;
- Totale scalabilità del sistema, in grado di sostenere ogni espansione sia del numero dei sensori dispiegati che del numero di utenti.

La piattaforma software con le sue componenti può essere installata su cloud o datacenter esclusivi di proprietà del cliente, adeguatamente dimensionati e configurati.

Tutte le comunicazioni, a partire dai nodi multi-sensore fino alla piattaforma software, così come gli accessi a questa da parte degli utenti, avvengono tramite protocolli con protezione crittografica avanzati (LoRa, TSL) mentre i firmware dei dispositivi sono protetti da accesso e clonazione a livello di processore.

5.2 Protocollo LoRaWAN

LoRaWAN⁴ è un protocollo specifico costruito sulla base della tecnologia LoRa sviluppata dalla LoRa Alliance. Il protocollo utilizza lo spettro radio della banda ISM per consentire la comunicazione tra i sensori remoti e i gateway collegati alla rete, a basso consumo e lungo raggio su vasta area.

Questo approccio mira a creare uno standard per la costruzione di una LPWAN⁵ basata su un sistema hardware e software che è bi-direzionale, sicuro, interoperabile e in grado di fornire localizzazione precisa dei sensori senza l'uso di GPS.

La tecnologia LoRa offre un mix di vantaggi molto interessante. A lungo raggio e con basso consumo di energia permette la trasmissione sicura dei dati, sia in reti pubbliche che private. Utilizzando questa tecnologia in serie si ottiene una copertura maggiore rispetto a qualsiasi rete

⁴ Long Range wide-area network

⁵ Rete a lungo raggio e basso consumo

cellulare esistente. L'architettura di una tipica rete LoRaWAN è presentata nella **Figura 5.5** e mostra come i nodi finali possono essere di qualsiasi natura, quindi essere adatti a qualunque utilizzo.

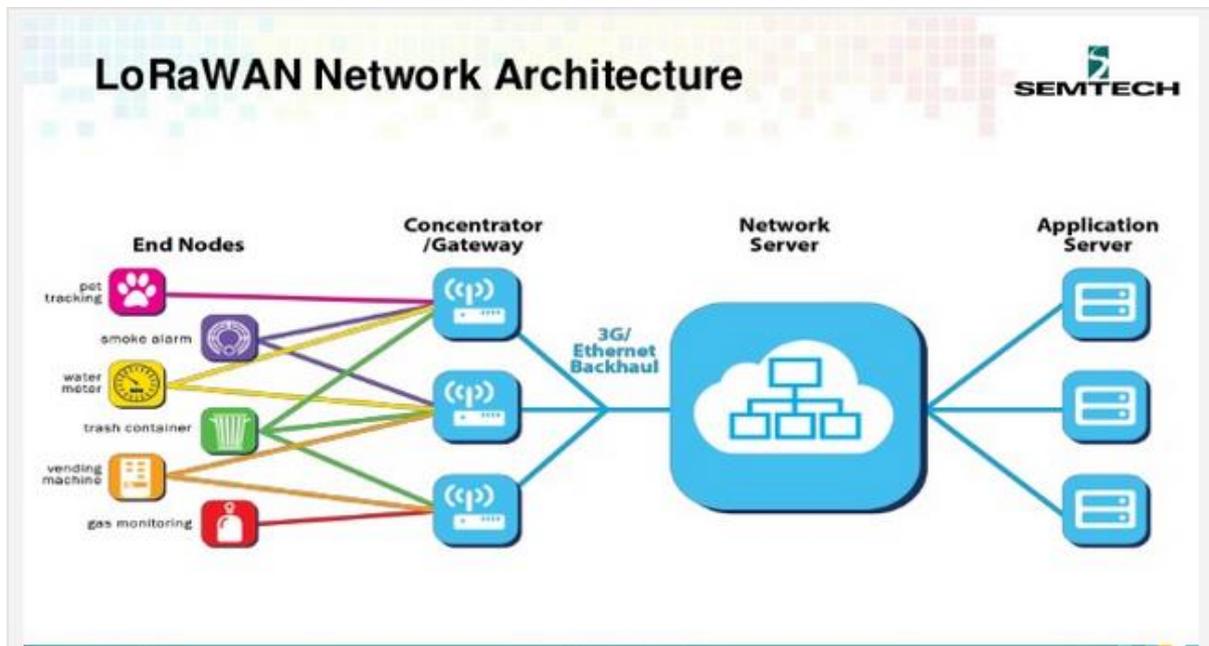


Figura 5.9: Architettura rete LoRaWAN

Le principali caratteristiche della tecnologia LoRa sono le seguenti:

- Geolocalizzazione: consente la localizzazione senza necessità di GPS e a basso consumo;
- Basso costo: riduce il costo dell'infrastruttura, le spese di mantenimento e il costo dei sensori;
- Standard: garantisce l'interoperabilità a livello globale;
- Bassa potenza: essendo progettata per il basso consumo, la tecnologia LoRa permette di ottenere una durata delle batterie dei sensori fino a 20 anni;
- Lungo raggio: i sensori LoRaWAN sono in grado di comunicare a distanze superiori ai 100 km in ambienti favorevoli, 15 km in campo aperto e a più di 2 km in ambienti urbani densamente popolati ad una velocità di trasmissione dati compresa fra 300 bit e 100 kbit;
- Sicurezza: la trasmissione dei dati viaggia in modalità crittografata end-to-end, grazie all'utilizzo delle chiavi AES128 che rendono praticamente impossibile l'intercettazione e la manomissione delle comunicazioni.

Tutte queste caratteristiche sono di fondamentale importanza per aumentare ancora il già l'enorme potenziale dell'Internet of Things (IoT) per le aziende. Infatti, questo protocollo

ha reso la raccolta dati da diversi dispositivi, la loro analisi ed elaborazione per un processo decisionale un processo ancora più rapido. Inoltre, ha risolto alcune criticità tecniche, quali una durata limitata della batteria, le distanze di comunicazione brevi, costi elevati e mancanza di regole.

5.3 Esempio di sistema di monitoraggio permanente su ponti e viadotti

In questa sezione viene schematicamente riportata a titolo di esempio una delle disposizioni proposte per il sistema di monitoraggio, riferita a un ponte a campata continua.

Nello schema proposto è stata prevista l'installazione di nodi multi-sensore ai lati delle pile sul livello di base e sul livello di sommità (**Figura 5.10**), per misurare le deformazioni sui lembi esterni della pila determinandone anche in tali sezioni le curvature medie; in tal modo è possibile comunque determinare in tali livelli le inclinazioni, nonché avere una ulteriore indicazione sullo sviluppo della deformazione lungo l'altezza.

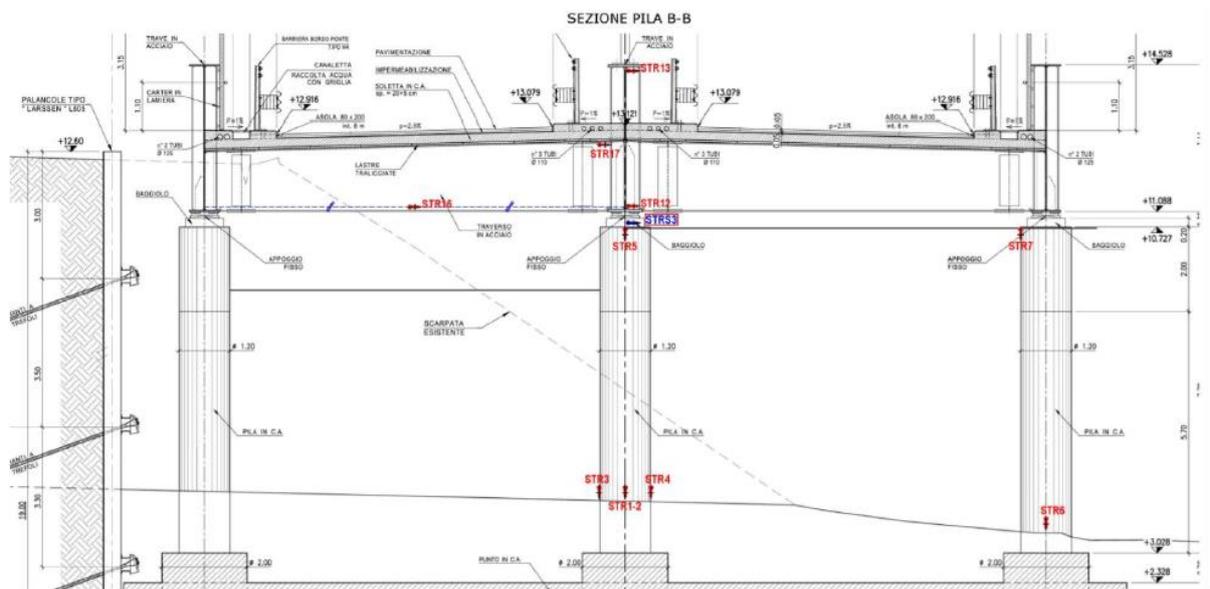


Figura 5.10: Nodi multi-sensore sulle pile

Si prevedono poi nodi multi-sensore accoppiati ai due lembi delle travi principali dell'impalcato per calcolarne le curvature e registrarne le inclinazioni ed effetti dinamici. Tali informazioni sono raccolte in sezioni di appoggio e di mezzeria delle travi principali, nonché sui traversi in corrispondenza delle pile (**Figura 5.11**).

Infine, si prevede agli appoggi intermedi delle travi dell'impalcato l'applicazione di terne di nodi multi-sensore con direzioni assegnate con il particolare compito di analizzare l'entità e la direzione delle deformazioni prodotte prevalentemente dagli sforzi di taglio.

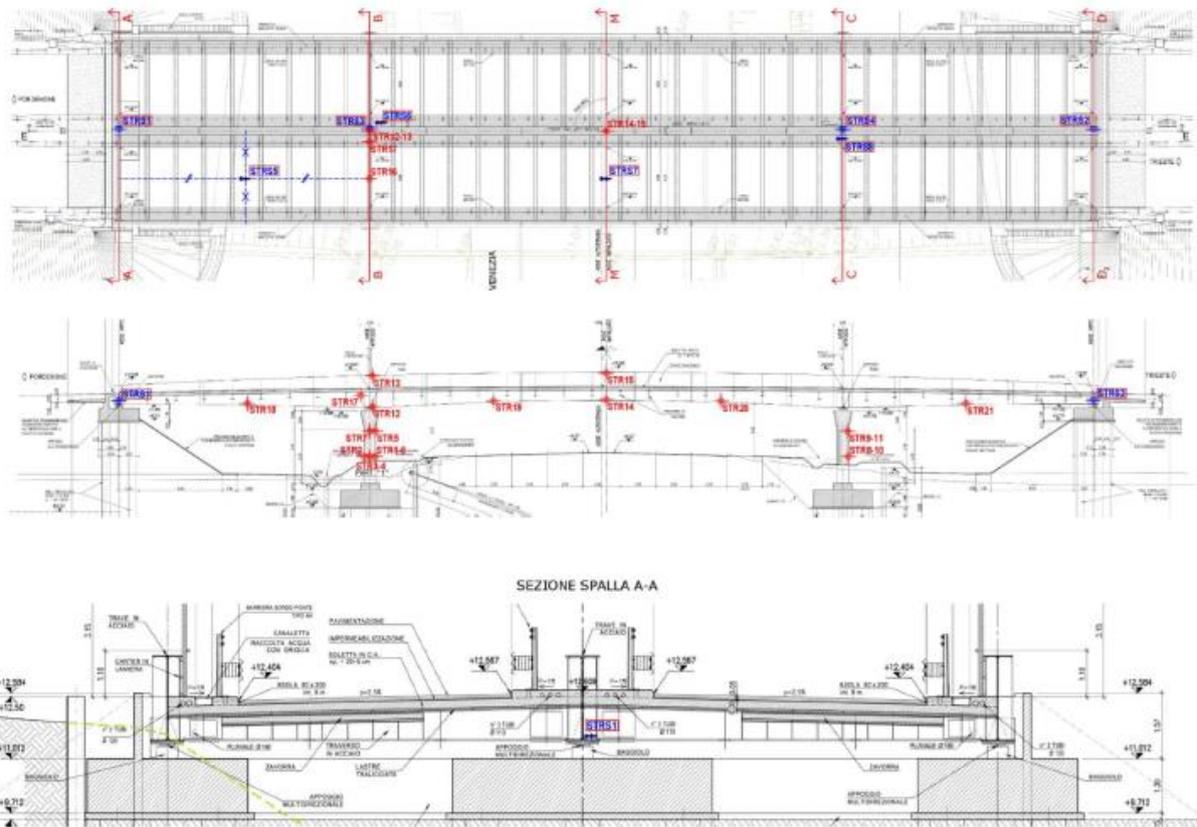


Figura 5.11: Nodi multi-sensore sull'impalcato

L'applicazione di nodi multi-sensore su un numero molto rilevante di elementi strutturali produce un sostanziale vantaggio, non solo legato alla densità delle misure effettuate, ma anche alla possibilità di realizzare un modello di misure sperimentali di confronto per diversi punti e parametri con il modello ad elementi finiti impiegato per il progetto o la verifica strutturale.

Diventa quindi possibile interpretare i dati misurati tramite i sensori e le loro variazioni nel tempo o a seguito di specifici eventi, anche alla luce della stessa analisi strutturale di progetto/verifica dell'opera. L'estensione temporale del monitoraggio su una scala temporale estesa ed intrapresa contestualmente alla messa in opera degli elementi strutturali risulta un aspetto chiave per la corretta interpretazione dei dati con individuazione e discriminazione delle tendenze del tempo, degli effetti ciclici, degli effetti specifici derivanti da eventi temporalmente limitati.

La decisione sul posizionamento dei nodi multi-sensore deriva direttamente dall'individuazione degli elementi più significativi sotto il profilo dell'analisi strutturale o della disamina specifica dell'opera; lo schema proposto, da intendersi preliminare, ha lo scopo prevalente di illustrare una possibile metodologia e chiarire i vantaggi dell'estensione e capillarità della proposta effettuata.

Nel caso di eventi sismici o comunque dinamici, la rete di sensori sismografici che il sistema proposto da Sysdev dispiega permette di ricavare informazioni circa l'entità degli effetti del sisma che si sono esercitati sulla struttura nel suo complesso e su alcuni suoi componenti. Tali informazioni risultano più approfondite e dettagliate rispetto a quelle disponibili al progettista per strutture non monitorate o monitorate con ridotto dispiegamento di parametri misurati.

In particolare, con riferimento ad un determinato evento sismico sarà possibile ricavare informazioni specifiche sull'impulso sismico effettivo verificatosi, sulla risposta dinamica della struttura reale, sugli effetti e sulle deformazioni generatesi, sulla presenza di significativo danneggiamento a seguito dell'evento. I nodi multi-sensore consentono infatti di registrare accelerazioni, deformazioni ed inclinazioni cui sono soggetti gli elementi strutturali, o porzioni di essi, su cui sono installati, così da consentire la stima delle azioni sismiche agenti e stati deformativi residui da esse generati.

5.4 Metodo polinomiale con errori sulle misure di inclinazione e deformazione

In questa sezione viene applicato il metodo polinomiale alla trave costruita nel software DOLMEN 3D STRUTTURA, già analizzata nella sezione 4.1.3.1 di questa tesi. La sezione e le caratteristiche della trave vengono rappresentate nella **Figura 4.5** e nella **Tabella 4.1**, rispettivamente. La trave risulta essere semplicemente appoggiata con un carico uniformemente distribuito di 300 kN/m. Immaginando di aver attrezzato la trave con 6 coppie di nodi multi-sensore SHBox (**Figura 5.12**) che permettono di misurare le inclinazioni e la deformazione al lembo superiore e inferiore. Queste due ultime quantità vengono utilizzate per il calcolo della curvatura della sezione. Mentre come inclinazione in quel punto viene usata la media dei due strumenti.

Inoltre vengono analizzati diversi schemi statici: trave semplicemente appoggiata, trave doppiamente incastrata, mensola, cioè un'estremità incastrata e l'altra libera, e una trave semplicemente appoggiata con due carichi concentrati.

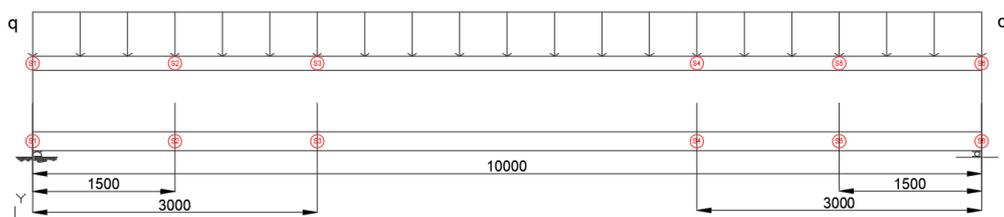


Figura 5.12: Trave semplicemente appoggiata e posizionamento dei nodi multi-sensori SHBox

Per il primo caso, rappresentato da una trave semplicemente appoggiata con carico uniformemente distribuito, si sono usati come condizioni al contorno per il metodo polinomiale i sei valori di inclinazione media e i quattro valori di curvatura, escludendo i due valori sugli estremi perché ovviamente nulli, a cui sono state aggiunte le due condizioni sull'appoggio di abbassamento nullo. Si sono ottenute così dodici condizione al contorno e di conseguenza l'andamento della deformata risulta approssimato da un polinomio di undicesimo grado.

I risultati ottenuti utilizzando i valori di inclinazione e deformazione esatti ricavati dal software, cioè privi di errori, sono mostrati in forma grafica in **Figura 5.13** e in forma tabellare nella **Tabella 5.1**.

Sezione	Abbassamento misurato con dolmen	Abbassamento polinomio con valori esatti	Errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00
1.5	-22.343	-20.430	-8.56
3	-39.262	-36.112	-8.02
5	-48.162	-44.412	-7.79
7	-39.262	-36.112	-8.02
8.5	-22.343	-20.430	-8.56
10	0.000	0.000	0.00

Tabella 5.1: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la trave semplicemente appoggiata

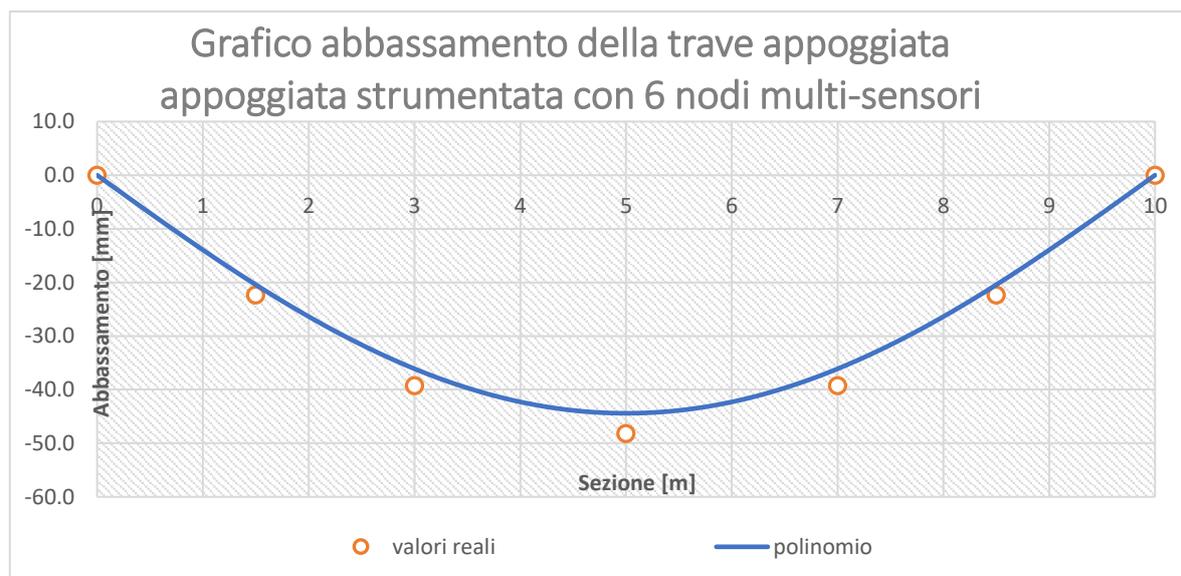


Figura 5.13: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per la trave semplicemente appoggiata

Come si può notare l'errore fra l'abbassamento stimato con il metodo polinomiale e quella misurata risulta essere circa 8%, che può essere ritenuto un valore accettabile e che approssima molto bene l'andamento della deformata reale.

Successivamente si è pensato di partire dai valori di inclinazione e curvatura ritenuti privi di errore ricavati dal programma, e di considerare le accuratèzze degli elementi multi-sensore fornite dalla Sysdev. I data sheet degli strumenti forniscono:

- $\pm 0.05^\circ$ per l'inclinazione;
- Per l'estensimetro, invece, l'accuratèzza è data dalla somma di: ± 10 microstrain e $\pm 1\%$ del valore restituito.

Pertanto si sono aggiunti i valori di errore sia positivo che negativo su entrambe le misurazioni e si è ricavato l'andamento della deformata attraverso il metodo polinomiale. I valori ottenuti sono rappresentati nelle **Tabelle 5.2** e **5.3** ed è possibile notare che per la freccia in mezzeria l'errore varia tra 0.23% (in caso di errore positivo sulle misure) e 15.34% (in caso di errore negativo sulle misure).

Valori nei punti di misura trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-22.343	-20.430	-8.56	-21.594	-3.35
3	-39.262	-36.112	-8.02	-38.571	-1.76
5	-48.162	-44.412	-7.79	-48.052	-0.23
7	-39.262	-36.112	-8.02	-38.571	-1.76
8.5	-22.343	-20.430	-8.56	-21.594	-3.35
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.2: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave semplicemente appoggiata

Valori nei punti di misura trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-22.343	-20.43	-8.56	-19.266	-13.77
3	-39.262	-36.11	-8.02	-33.653	-14.29
5	-48.162	-44.41	-7.79	-40.772	-15.34
7	-39.262	-36.11	-8.02	-33.653	-14.29
8.5	-22.343	-20.43	-8.56	-19.266	-13.77
10	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.3: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave semplicemente appoggiata

Come si evince dalle tabelle l'errore in tutti i casi si attesta tra il 0.23% e il 15.34%, che risultano essere valori di errore percentuale accettabili e che approssimano molto bene l'andamento della deformata lungo lo sviluppo della trave. Pertanto si può concludere che gli strumenti sono molto performanti e restituiscono valori molto fedeli alla realtà.

Nella **Figura 5.14** viene mostrato il confronto grafico fra l'andamento della deformata ricavato dai valori esatti di inclinazione e deformazione, quelli affetti da errore positivo massimo oppure quelli affetti da errore negativo massimo e i valori di abbassamento misurati nei punti strumentati e nella mezzeria.

Si può affermare, quindi, che l'approssimazione dell'andamento della deformata attraverso il metodo polinomiale, che sfrutta le misure fatte da questi sensori ha un range di errore che va dallo 0 al 15% circa e, pertanto, risulta essere un sistema molto valido per il monitoraggio strutturale.

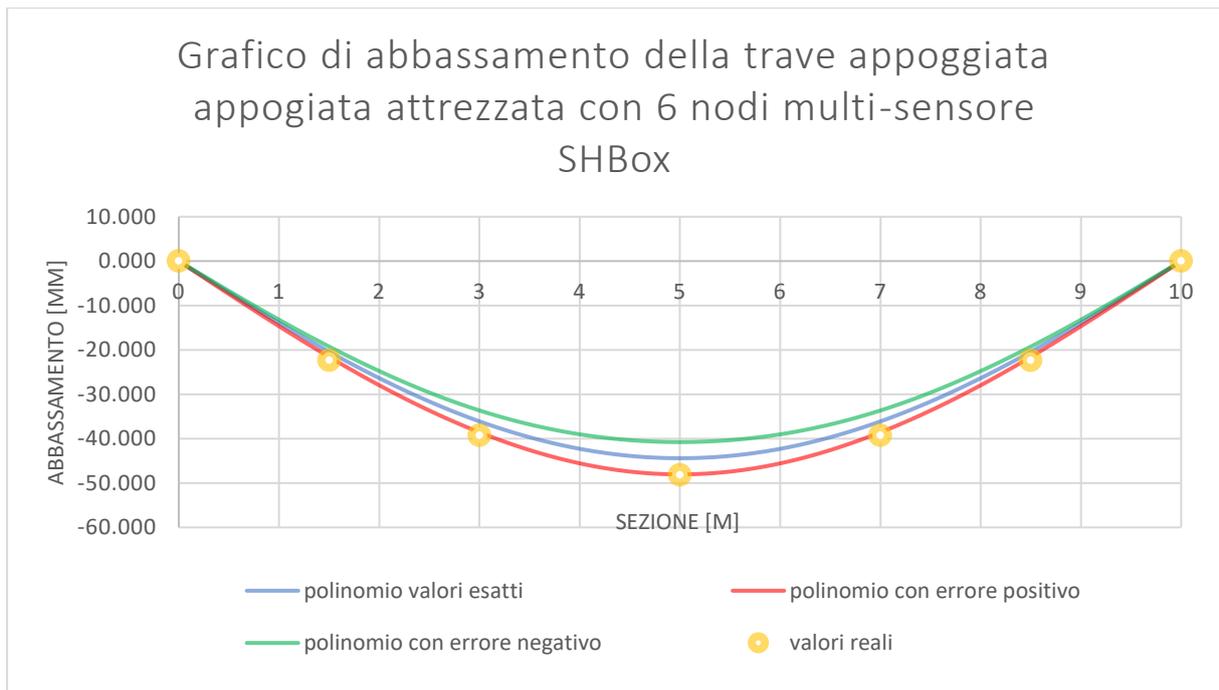


Figura 5.14: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave semplicemente appoggiata

IL secondo caso analizzato è quello di una trave doppiamente incastrata con un carico uniformemente distribuito di 300 kN/m (**Figura 5.15**). Le caratteristiche della trave sono le stesse della trave precedente e viene attrezzata sempre con sei coppie di nodi multi-sensore SHBox. Come nel caso precedente, si parte dall'analizzare l'approssimazione dell'andamento della deformata della trave sfruttando i valori esatti di inclinazione e deformazione forniti dai nodi multi-sensore, ovvero dal software DOLMEN.

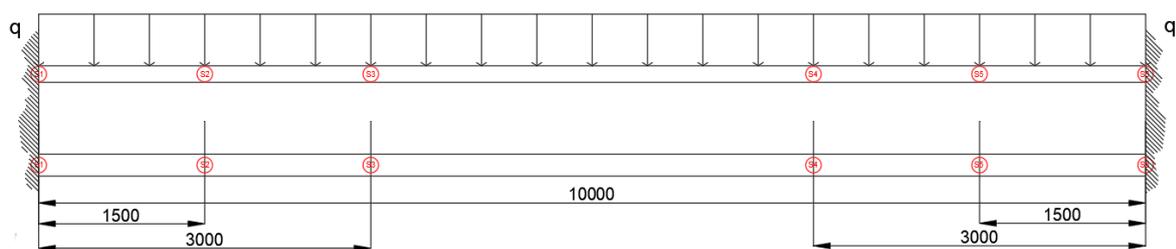


Figura 5.15: Trave doppiamente incastrata e posizionamento dei sensori

Nel caso in esame il metodo polinomiale approssima la funzione abbassamento attraverso un polinomio di grado tredici, in quanto si hanno a disposizione quattordici condizioni al contorno, ovvero sei valori di curvatura, sei valori di inclinazione (inclusi i valori nulli di rotazione agli estremi dovuti al vincolo) e le due condizioni di abbassamento nullo agli estremi dovuto al vincolo. I valori di abbassamento ottenuti con il metodo polinomiale sono tabellati nella

Tabella 5.4, dove vengono confrontati con i valori di abbassamento misurati sul campo in corrispondenza degli strumenti, mentre in **Figura 5.16** si può notare il confronto grafico fra i due andamenti.

Nel caso di trave doppiamente incastrata si evince che l'errore percentuale è più alto rispetto al caso precedente di trave semplicemente appoggiata, raggiungendo in mezzeria un errore di circa 26%.

Sezione	Abbassamento misurato con dolmen	Abbassamento polinomio con valori esatti	Errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00
1.5	-4.223	-3.313	-21.55
3	-9.417	-7.022	-25.43
5	-12.632	-9.295	-26.42
7	-9.417	-7.022	-25.43
8.5	-4.223	-3.313	-21.55
10	0.000	0.000	0.00

Tabella 5.4: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la trave doppiamente incastrata

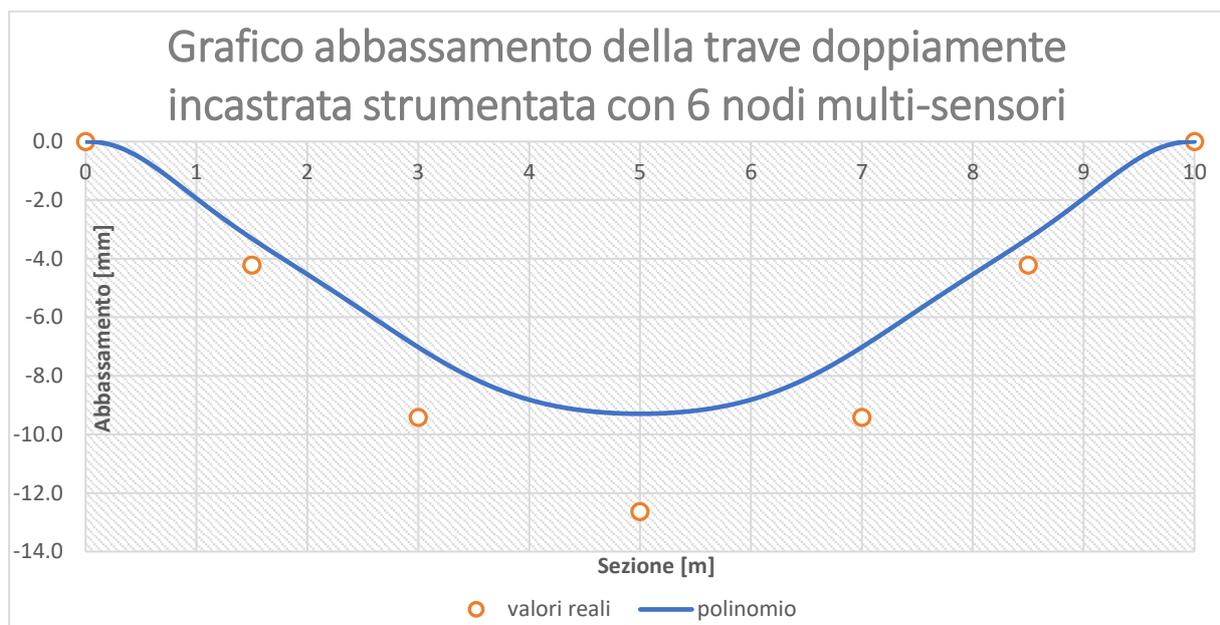


Figura 5.16: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per la trave doppiamente incastrata

Anche in questo caso si sono sfruttate le accuratèzze dei nodi multi-sensore fornite dai data sheet e si è analizzato il comportamento in caso di errore massimo sia negativo che positivo.

I valori di abbassamento ottenuti sono raggruppati nelle **Tabelle 5.5** e **5.6**, mentre la **Figura 5.17** mostra il confronto grafico fra i valori misurati sul campo e l'andamento della deformata stimato con il metodo polinomiale in tutti e tre i casi, ovvero valori di inclinazione e deformazione esatti, valori affetti da errore massimo positivo e valori affetti da errore massimo negativo.

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-4.223	-3.313	-21.55	-4.596	8.83
3	-9.417	-7.022	-25.43	-9.605	1.99
5	-12.632	-9.295	-26.42	-13.072	3.48
7	-9.417	-7.022	-25.43	-9.605	1.99
8.5	-4.223	-3.313	-21.55	-4.596	8.84
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.5: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave doppiamente incastrata

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-4.223	-3.31	-21.55	-2.029	-51.94
3	-9.417	-7.02	-25.43	-4.439	-52.86
5	-12.632	-9.29	-26.42	-5.517	-56.33
7	-9.417	-7.02	-25.43	-4.439	-52.86
8.5	-4.223	-3.31	-21.55	-2.030	-51.94
10	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.6: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave doppiamente incastrata

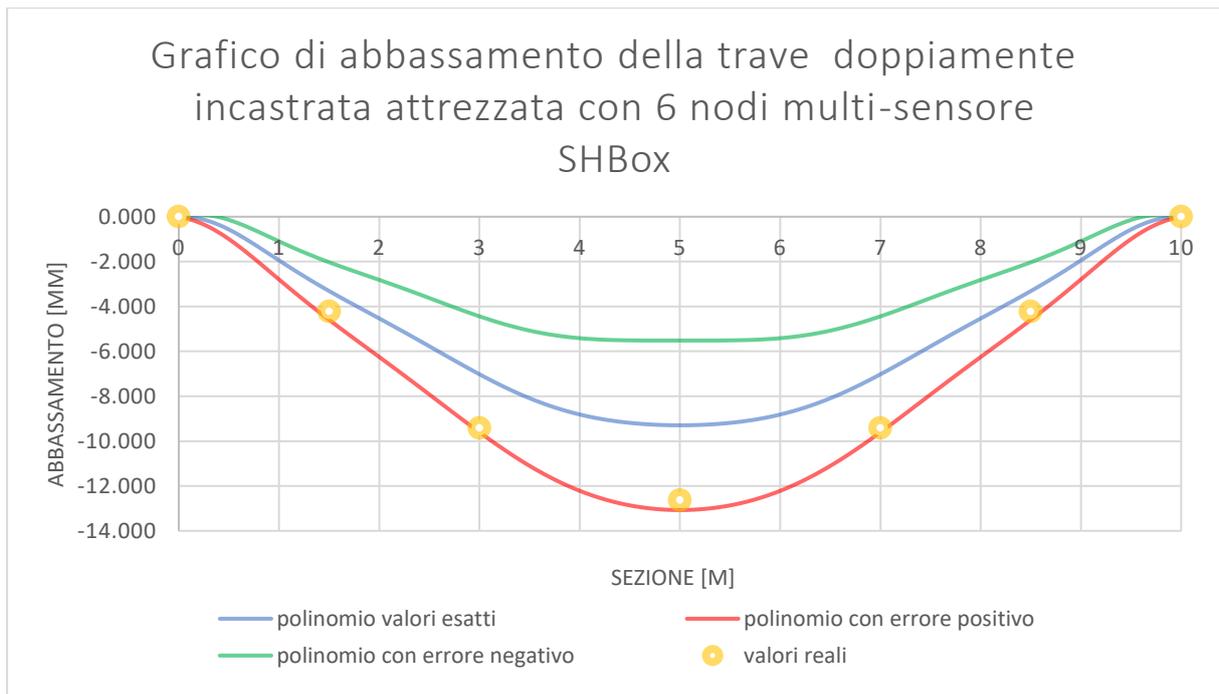


Figura 5.17: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave doppiamente incastrata

Si evince come l'errore percentuale nel caso di trave doppiamente incastrata risulti essere nettamente più alto rispetto al caso precedente di trave semplicemente appoggiata. Infatti il range di errore percentuale per l'abbassamento in mezzeria varia tra 3.48% e 56.33%, che risulta essere un valore molto alto e che quindi può portare a valutazioni non veritiere.

Adesso viene analizzato il caso di una mensola con un carico uniformemente distribuito di 50 kN/m. La trave presenta quindi un incastro ad una estremità, mentre l'altra estremità è libera (**Figura 5.18**). Le caratteristiche della trave in esame sono le stesse di quella analizzata nei casi precedenti.

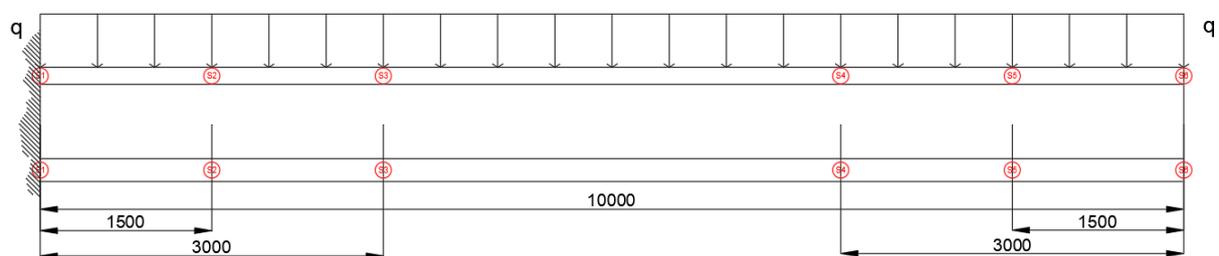


Figura 5.18: Mensola e posizionamento dei sensori

Anche in questo caso viene applicato il metodo polinomiale per determinare l'andamento della deformata lungo la lunghezza della trave. Il polinomio interpolante risulta essere di grado

undici, in quanto sono presenti dodici condizioni al contorno, ovvero sei valori di inclinazione media misurata dagli strumenti (tra cui la rotazione nulla nell'incastro dovuta alla condizione di vincolo), cinque valori di curvatura (escludendo quella all'estremo libero perché ovviamente nulla) e la condizione di abbassamento nullo nell'estremità vincolata.

I valori di abbassamento ottenuti con il metodo polinomiale sono tabellati nella **Tabella 5.7**, dove vengono confrontati con i valori di abbassamento misurati sul campo in corrispondenza degli strumenti, mentre in **Figura 5.19** si può notare il confronto grafico fra i due andamenti.

sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00
1.5	-3.584	-2.890	-19.36
3	-11.699	-10.424	-10.90
5	-27.042	-25.167	-6.93
7	-45.102	-42.827	-5.04
8.5	-59.303	-56.859	-4.12
10	-73.559	-71.059	-3.40

Tabella 5.7: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la mensola

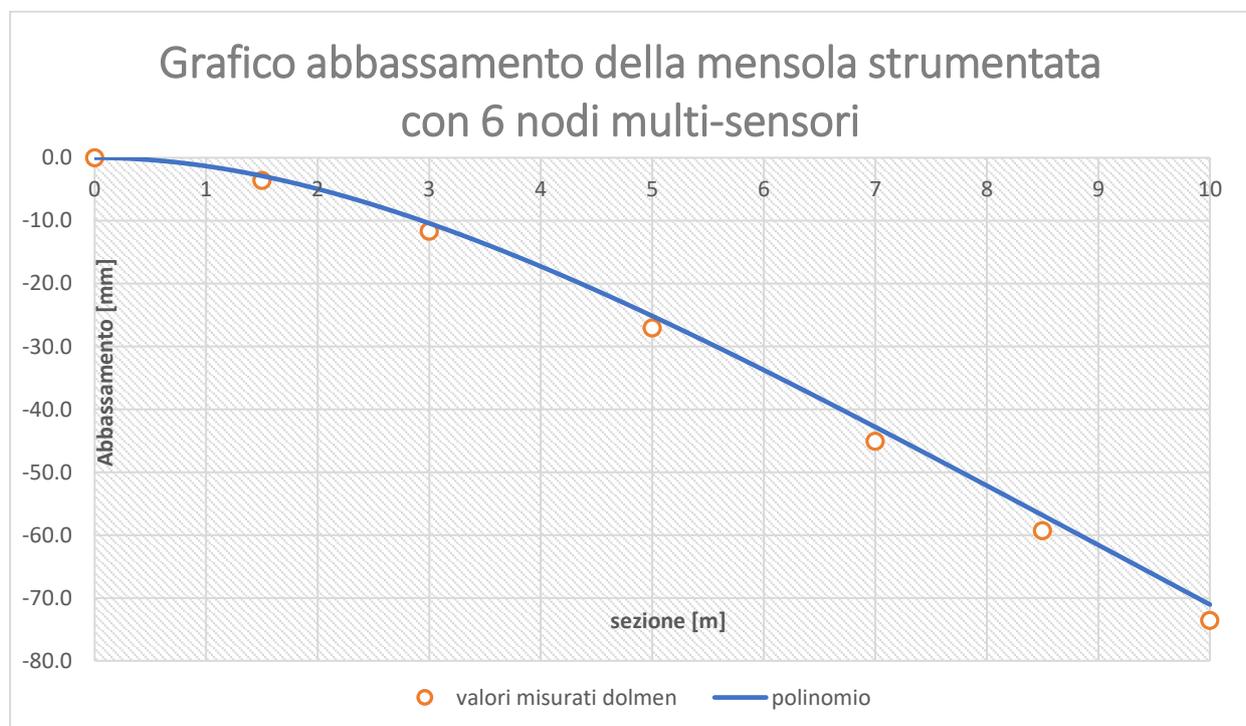


Figura 5.19: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per mensola

Si può notare subito come per il punto più rappresentativo, ovvero l'estremo libero, l'errore percentuale sia di circa il 3%. Questo indica che questa metodologia produce dei risultati affidabili per questo schema statico.

Anche in questo caso si sono sfruttate le accuratezze dei nodi multi-sensore fornite dai data sheet e si è analizzato il comportamento in caso di errore massimo sia negativo che positivo.

I valori di abbassamento ottenuti sono raggruppati nelle **Tablelle 5.8 e 5.9**, mentre la **Figura 5.20** mostra il confronto grafico fra i valori misurati sul campo e l'andamento della deformata stimato con il metodo polinomiale in tutti e tre i casi, ovvero valori di inclinazione e deformazione esatti, valori affetti da errore massimo positivo e valori affetti da errore massimo negativo.

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-3.584	-2.890	-19.36	-4.186	16.80
3	-11.699	-10.424	-10.90	-13.023	11.32
5	-27.042	-25.167	-6.93	-29.067	7.49
7	-45.102	-42.827	-5.04	-45.666	1.25
8.5	-59.303	-56.859	-4.12	-58.411	-1.50
10	-73.559	-71.059	-3.40	-71.579	-2.69

Tabella 5.8: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la mensola

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-3.584	-2.89	-19.36	-1.344	-62.50
3	-11.699	-10.42	-10.90	-7.560	-35.38
5	-27.042	-25.17	-6.93	-20.774	-23.18
7	-45.102	-42.83	-5.04	-39.269	-12.93
8.5	-59.303	-56.86	-4.12	-54.572	-7.98
10	-73.559	-71.06	-3.40	-69.553	-5.45

Tabella 5.9: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la mensola

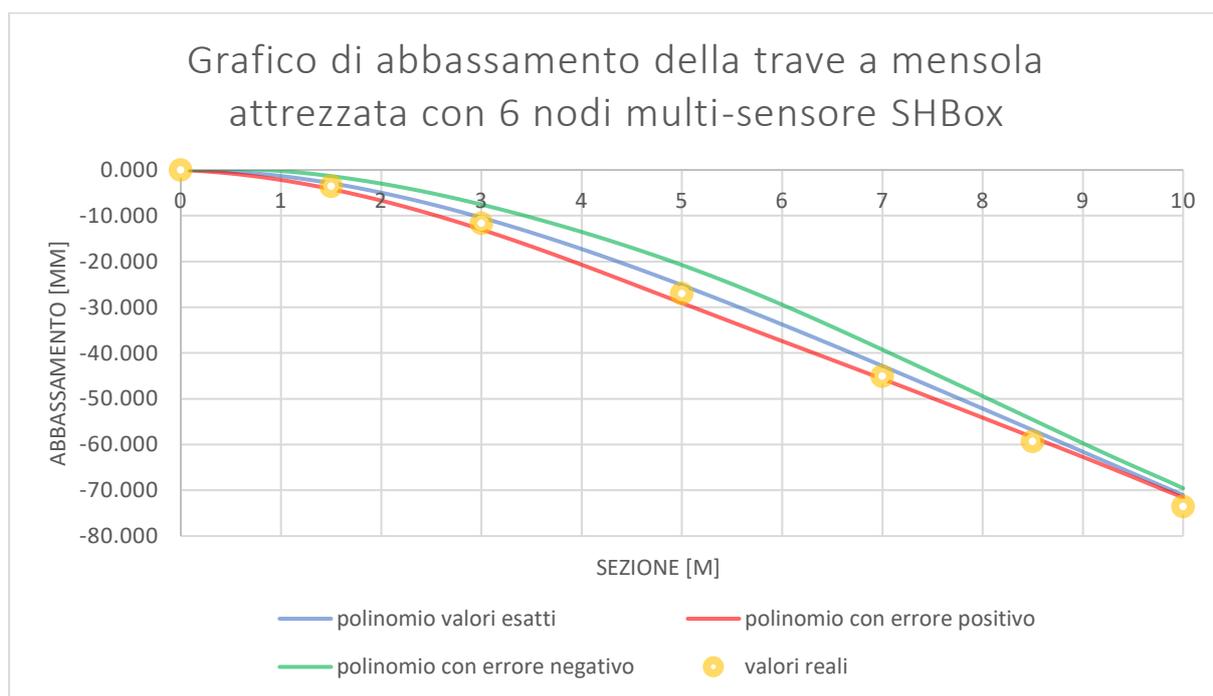


Figura 5.20: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la mensola

Dalle tabelle e dalla figura sovrastante si vede che l'approssimazione della deformata è molto soddisfacente, con errore percentuale molto basso dell'ordine del 3 o 5 % nel punto più rappresentativo.

Infine, viene analizzato il caso in cui la trave sia semplicemente appoggiata, ma è caricata con due carichi concentrati di intensità pari a 1500 kN ciascuno. I carichi concentrati sono posizionati a 3 m da entrambe le estremità come rappresentato in **Figura 5.21**.

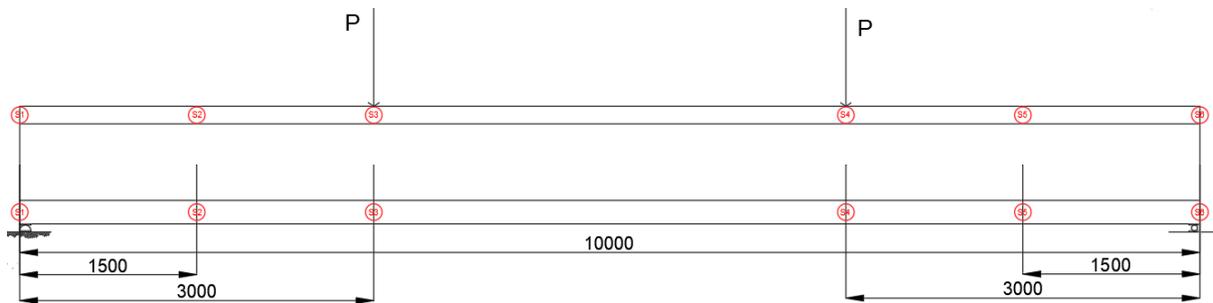


Figura 5.21: Trave semplicemente appoggiata con due carichi concentrati e posizionamento dei sensori

Anche in questo caso viene applicato il metodo polinomiale per determinare l'andamento della deformata lungo la lunghezza della trave. Il polinomio interpolante risulta essere di grado undici, in quanto sono presenti dodici condizioni al contorno, ovvero sei valori di inclinazione media misurata dagli strumenti, quattro valori di curvatura (escludendo quelle di entrambi gli estremi perché ovviamente nulla) e la condizione di abbassamento nullo all'estremità per le condizioni del vincolo.

I valori di abbassamento ottenuti con il metodo polinomiale sono tabellati nella **Tabella 5.10**, dove vengono confrontati con i valori di abbassamento misurati sul campo in corrispondenza degli strumenti, mentre in **Figura 5.22** si può notare il confronto grafico fra i due andamenti.

sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00
1.5	-28.151	-26.328	-6.47
3	-50.546	-46.515	-7.97
5	-60.778	-56.531	-6.99
7	-50.546	-46.515	-7.97
8.5	-28.151	-26.328	-6.47
10	0.000	0.000	0.00

Tabella 5.10: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la trave con due carichi concentrati

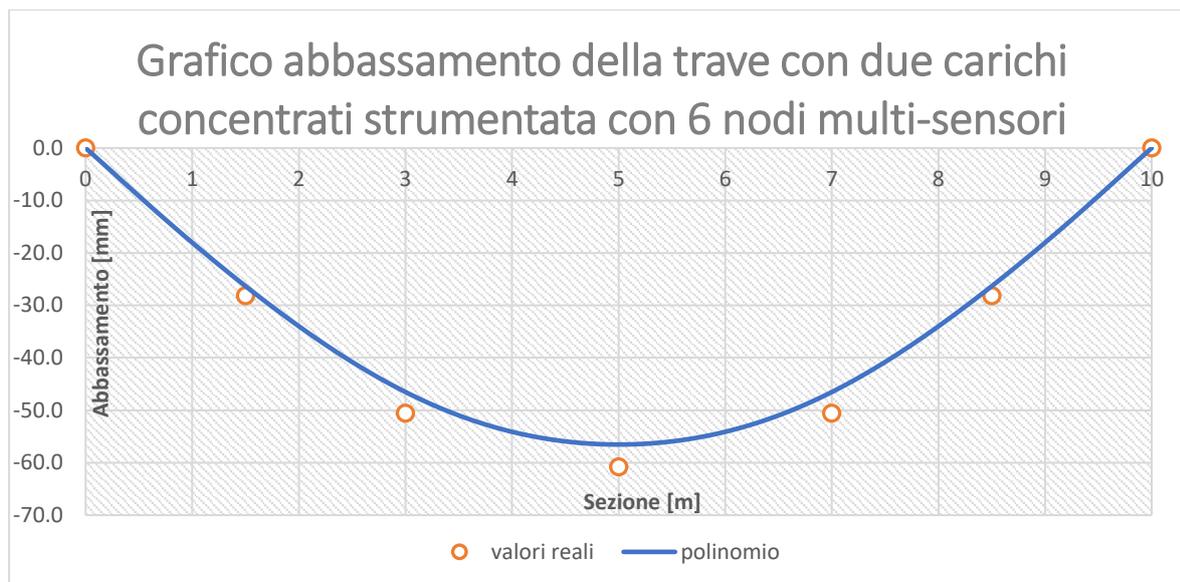


Figura 5.22: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per trave con due carichi concentrati

Dalla tabella e dal grafico è possibile notare come l'errore percentuale fra l'abbassamento stimato e quello misurato risulta essere contenuto, si parla di un errore per la sezione di mezzaria di circa il 7%. Questo ci permette di affermare, che per questo particolare schema statico e questa configurazione di carico, la metodologia risulta essere efficace e stima in maniera abbastanza corretta l'andamento della deformata lungo la lunghezza della trave.

Anche in questo caso si sono sfruttate le accuratezze dei nodi multi-sensore fornite dai data sheet e si è analizzato il comportamento in caso di errore massimo sia negativo che positivo.

I valori di abbassamento ottenuti sono raggruppati nelle **Tabelle 5.11 e 5.12**, mentre la **Figura 5.23** mostra il confronto grafico fra i valori misurati sul campo e l'andamento della deformata stimato con il metodo polinomiale in tutti e tre i casi, ovvero valori di inclinazione e deformazione esatti, valori affetti da errore massimo positivo e valori affetti da errore massimo negativo.

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-28.151	-26.328	-6.47	-27.492	-2.34
3	-50.546	-46.515	-7.97	-48.975	-3.11
5	-60.778	-56.531	-6.99	-60.171	-1.00
7	-50.546	-46.515	-7.97	-48.975	-3.11
8.5	-28.151	-26.328	-6.47	-27.492	-2.34
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.11: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave con due carichi concentrati

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-28.151	-26.33	-6.47	-25.164	-10.61
3	-50.546	-46.52	-7.97	-44.056	-12.84
5	-60.778	-56.53	-6.99	-52.891	-12.98
7	-50.546	-46.52	-7.97	-44.056	-12.84
8.5	-28.151	-26.33	-6.47	-25.164	-10.61
10	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.12: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave con due carichi concentrati

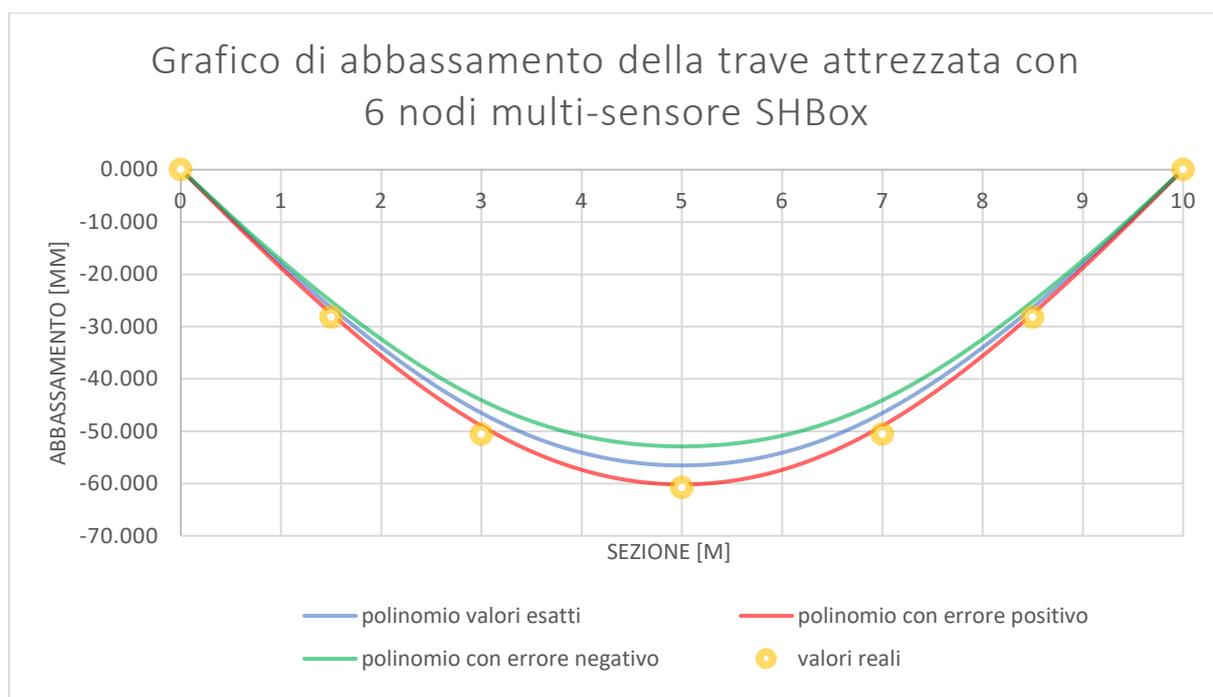


Figura 5.23: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave con due carichi concentrati

Anche in questo caso si evince che l'approssimazione dell'abbassamento attraverso il metodo polinomiale funziona bene anche quando le misure dei nodi multi-sensori sono affetti da errori, fornendo risultati affetti da un errore percentuale che varia nel range da 1 a 13% circa per l'abbassamento in mezziera.

Si può concludere affermando che l'accoppiamento di questa metodologia con i nodi multi-sensore forniti da Sysdev risulta essere molto efficace in quasi tutti i casi analizzati. Il caso peggiore risulta essere la trave doppiamente incastrata dove l'errore poteva variare fino a valori superiori al 50%, falsando completamente i risultati.

Inoltre bisogna tenere in conto, che le misure da cui si è partiti sono misure di inclinazione, deformazione e abbassamento fornite da un software, quindi sono ritenute prive di errori e in condizioni controllate. Mentre se si prendono le misure fornite da strumenti presenti su un'opera reale, le misure possono subire dei condizionamenti di vario tipo, ad esempio, le condizioni ambientali possono creare un rumore nei dati.

Infine, sono stati analizzati gli stessi casi visti precedentemente, supponendo per l'inclinometro un'accuratezza migliorata, ovvero pari a $\pm 0.005^\circ$, mentre l'errore sulle misure fornite dall'estensimetro rimane lo stesso. Quindi si è valutato l'impatto di questa accuratezza sugli

errori percentuali riscontrati tra l'abbassamento ottenuto attraverso il metodo polinomiale e l'abbassamento misurato.

Si parte dal caso di trave semplicemente appoggiata soggetta a un carico uniformemente distribuito di 300 kN/m. I risultati ottenuti sono tabellati in **Tabella 5.13** e **5.14** e rappresentati graficamente in **Figura 5.24**.

Valori nei punti di misura trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-22.343	-20.430	-8.56	-20.547	-8.04
3	-39.262	-36.112	-8.02	-36.358	-7.40
5	-48.162	-44.412	-7.79	-44.776	-7.03
7	-39.262	-36.112	-8.02	-36.358	-7.40
8.5	-22.343	-20.430	-8.56	-20.547	-8.04
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.13: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave semplicemente appoggiata con accuratezza migliorata

Valori nei punti di misura trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-22.343	-20.43	-8.56	-20.314	-9.08
3	-39.262	-36.11	-8.02	-35.866	-8.65
5	-48.162	-44.41	-7.79	-44.047	-8.54
7	-39.262	-36.11	-8.02	-35.866	-8.65
8.5	-22.343	-20.43	-8.56	-20.314	-9.08
10	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.14: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave semplicemente appoggiata con accuratezza migliorata

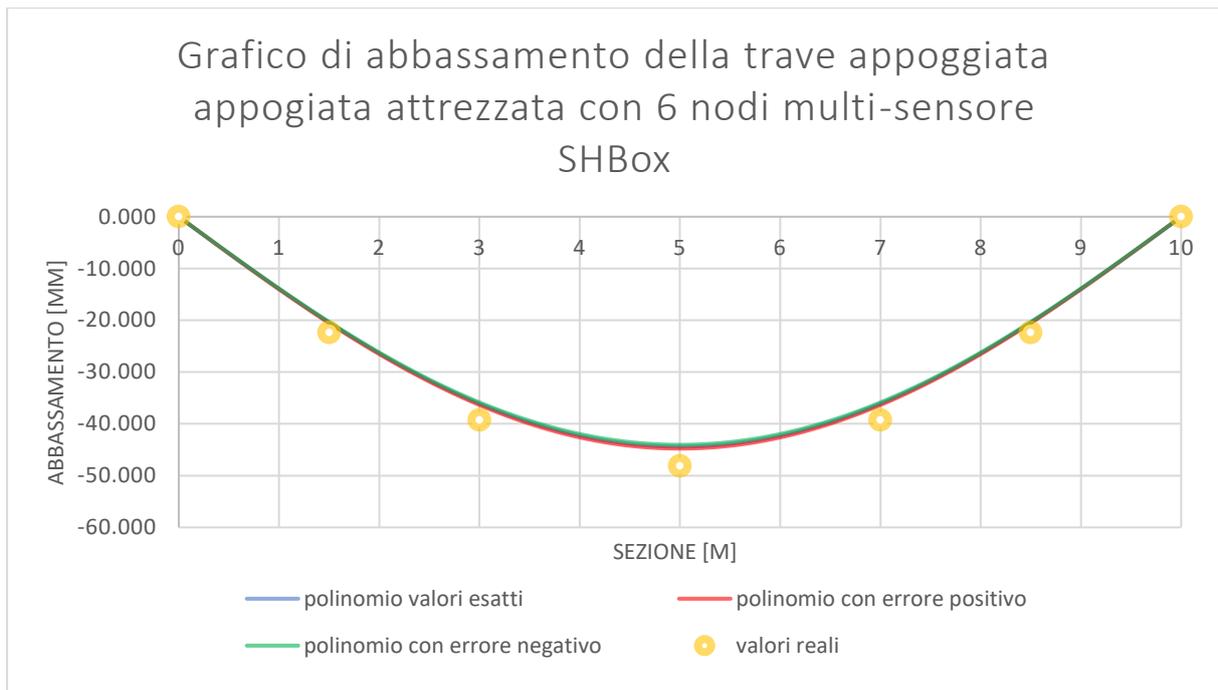


Figura 5.24: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave semplicemente appoggiata con accuratezza migliorata

In questo caso l'errore percentuale rimane sempre intorno al 8% per la misura di abbassamento in mezzeria, ciò significa che anche le misure affette da errore massimo negativo e positivo approssimano, allo stesso modo delle misure esatte, l'andamento della deformata lungo la trave. Quindi viene quasi ad annullarsi del tutto il range di errore percentuale che era presente con l'accuratezza precedente, denotando una maggiore applicabilità dei nodi multi-sensore, in quanto si commettono errori molto bassi.

Il secondo caso analizzato è quello di una trave doppiamente incastrata con carico uniformemente distribuito di 300 kN/m. I risultati ottenuti sono tabellati in **Tabella 5.15** e **5.16** e rappresentati graficamente in **Figura 5.25**.

Per questo caso gli errori percentuali variano in un range che va dal 23 al 30%, risultando ancora una volta gli errori più alti attenuati rispetto a tutti gli altri schemi statici, però rispetto al caso dove avevamo un'accuratezza peggiore il range si restringe molto. Infatti, in quel caso avevamo errori anche superiori al 50% per l'abbassamento misurato in mezzeria.

Inoltre, si può notare come questa volta i valori di abbassamento si discostino molto meno rispetto a prima. Sfruttando i valori esatti di inclinazione e deformazione si ottiene un errore percentuale sull'abbassamento in mezzeria di circa il 26%, mentre con errori positivi si arriva ad errore del 23% circa e con errore negativo si arriva al 30% circa.

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-4.223	-3.313	-21.55	-3.441	-18.51
3	-9.417	-7.022	-25.43	-7.280	-22.69
5	-12.632	-9.295	-26.42	-9.672	-23.43
7	-9.417	-7.022	-25.43	-7.280	-22.69
8.5	-4.223	-3.313	-21.55	-3.441	-18.51
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.15: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave doppiamente incastrata con accuratezza migliorata

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-4.223	-3.313	-21.55	-3.184	-24.59
3	-9.417	-7.022	-25.43	-6.764	-28.18
5	-12.632	-9.295	-26.42	-8.917	-29.41
7	-9.417	-7.022	-25.43	-6.764	-28.18
8.5	-4.223	-3.313	-21.55	-3.184	-24.59
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.16: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave doppiamente incastrata con accuratezza migliorata

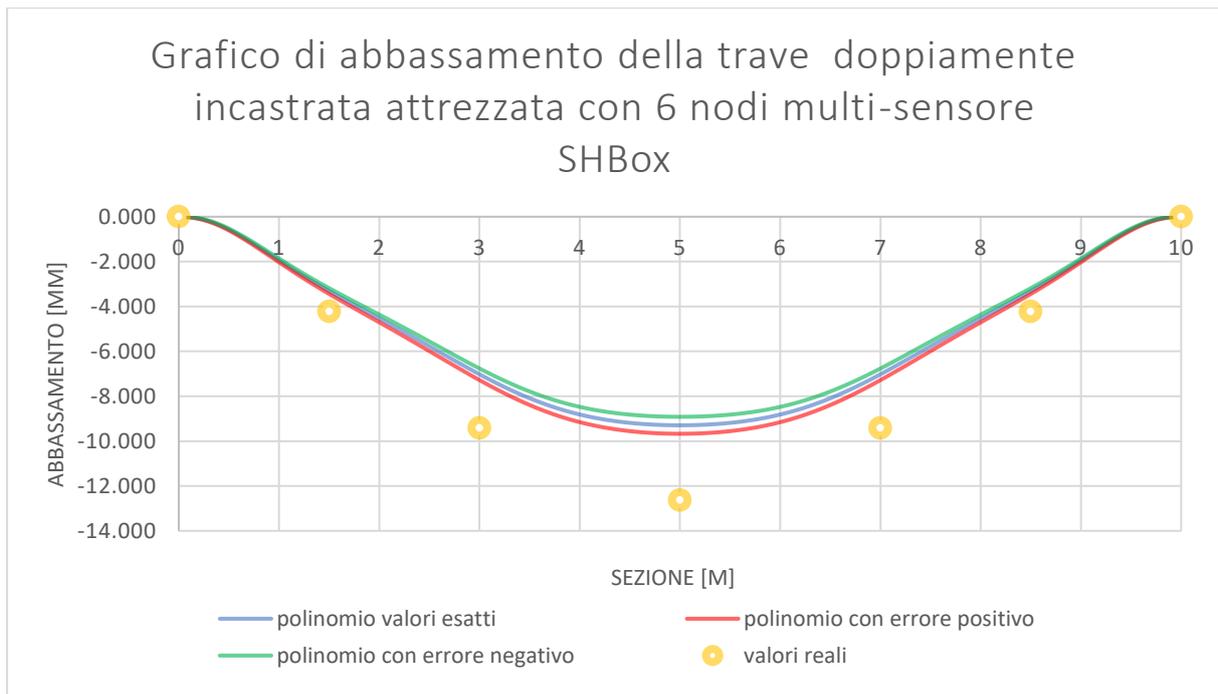


Figura 5.25: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave doppiamente incastrata con accuratezza migliorata

Il terzo caso riguarda una mensola, ovvero una trave con un'estremità incastrata e l'altro estremo libero soggetta ad un carico uniformemente distribuito di 50 kN/m. I risultati ottenuti sono tabellati in **Tabella 5.17** e **5.18** e rappresentati graficamente in **Figura 5.26**.

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-3.584	-2.890	-19.36	-3.019	-15.74
3	-11.699	-10.424	-10.90	-10.684	-8.68
5	-27.042	-25.167	-6.93	-25.557	-5.49
7	-45.102	-42.827	-5.04	-43.111	-4.41
8.5	-59.303	-56.859	-4.12	-57.014	-3.86
10	-73.559	-71.059	-3.40	-71.111	-3.33

Tabella 5.17: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la mensola con accuratezza migliorata

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-3.584	-2.89	-19.36	-2.510	-29.96
3	-11.699	-10.42	-10.90	-9.899	-15.39
5	-27.042	-25.17	-6.93	-24.284	-10.20
7	-45.102	-42.83	-5.04	-41.824	-7.27
8.5	-59.303	-56.86	-4.12	-55.969	-5.62
10	-73.559	-71.06	-3.40	-70.021	-4.81

Tabella 5.18: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la mensola con accuratezza migliorata

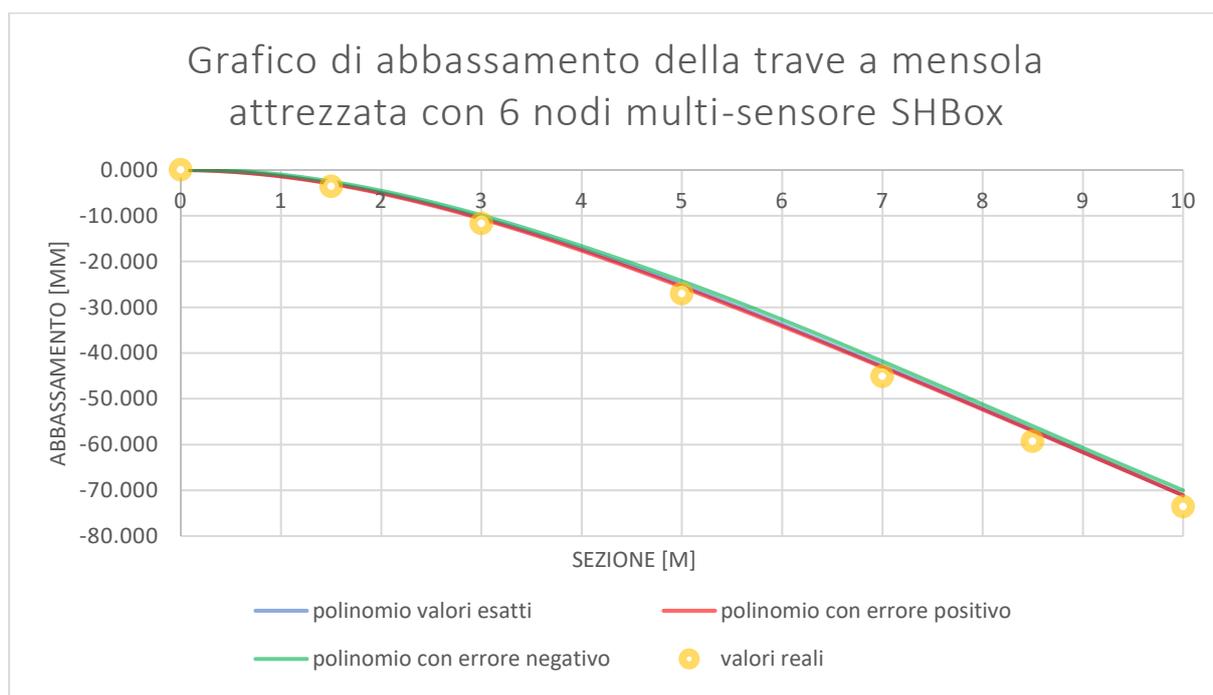


Figura 5.26: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la mensola con accuratezza migliorata

Anche in questo caso l'errore percentuale rimane sempre intorno al 4% per la misura di abbassamento all'estremo libero, ciò significa che anche le misure affette da errore massimo negativo e positivo approssimano, allo stesso modo delle misure esatte, l'andamento della deformata lungo la trave. Quindi viene quasi ad annullarsi del tutto il range di errore percentuale

che era presente con l'accuratezza precedente, denotando una maggiore applicabilità dei nodi multi-sensore, in quanto si commettono errori molto bassi.

L'ultimo schema statico analizzato è la trave semplicemente appoggiata con due carichi concentrati di 1500 kN ciascuno alla distanza di 3 m da entrambi gli appoggi. I risultati ottenuti sono tabellati in **Tabella 5.19** e **5.20** e rappresentati graficamente in **Figura 5.27**.

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore positivo	errore tra polinomio con errore positivo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00
1.5	-28.151	-26.328	-6.47	-26.445	-6.06
3	-50.546	-46.515	-7.97	-46.762	-7.49
5	-60.778	-56.531	-6.99	-56.895	-6.39
7	-50.546	-46.515	-7.97	-46.762	-7.49
8.5	-28.151	-26.328	-6.47	-26.445	-6.06
10	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.19: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave con due carichi concentrati con accuratezza migliorata

Valori nei punti di misura per la trave con 6 nodi multi-sensori					
sezione	abbassamento misurato con dolmen	abbassamento polinomio con valori esatti	errore tra polinomio con valori esatti e abbassamento misurato	abbassamento polinomio con errore negativo	errore tra polinomio con errore negativo e abbassamento misurato
x [m]	$\delta(x)$ [mm]	$\delta(x)$ [mm]	[%]	$\delta(x)$ [mm]	[%]
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
1.5	-28.151	-26.33	-6.47	-26.212	-6.89
3	-50.546	-46.52	-7.97	-46.269	-8.46
5	-60.778	-56.53	-6.99	-56.167	-7.59
7	-50.546	-46.52	-7.97	-46.269	-8.46
8.5	-28.151	-26.33	-6.47	-26.212	-6.89
10	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00

Tabella 5.20: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave con due carichi concentrati con accuratezza migliorata

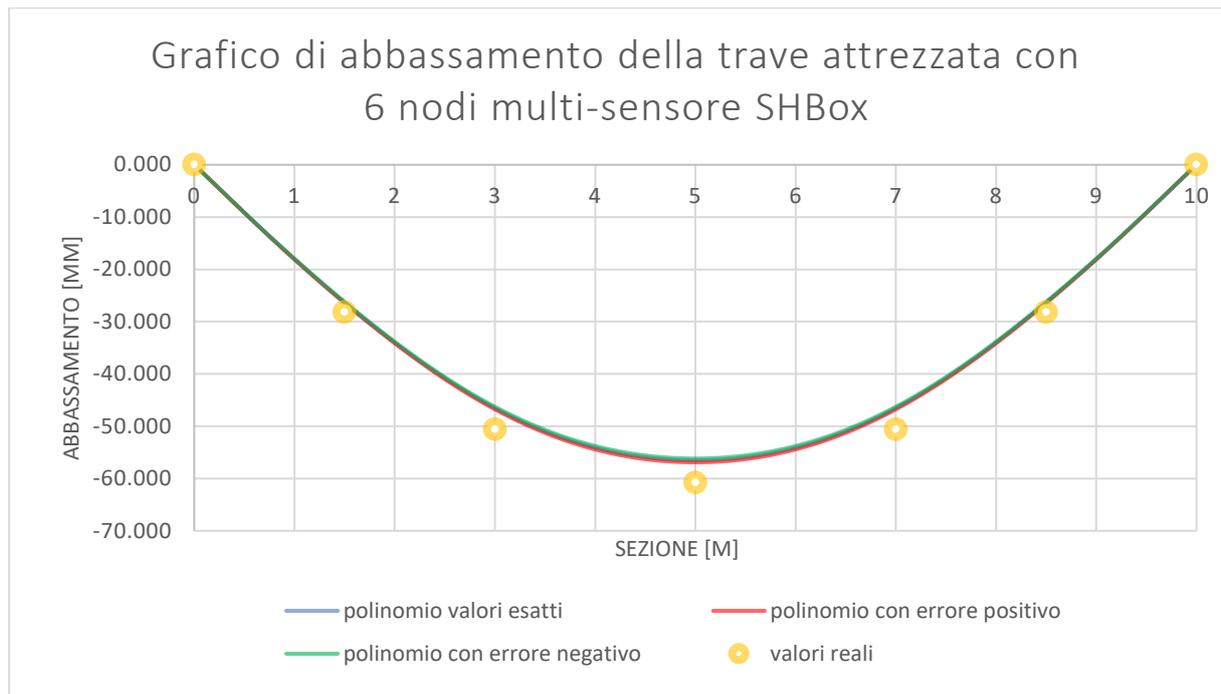


Figura 5.27: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave con due carichi concentrati con accuratezza migliorata

In questo ultimo caso l'errore percentuale rimane sempre intorno al 7% per la misura di abbassamento in mezzera, ciò significa che anche le misure affette da errore massimo negativo e positivo approssimano, allo stesso modo delle misure esatte, l'andamento della deformata lungo la trave. Quindi viene quasi ad annullarsi del tutto il range di errore percentuale che era presente con l'accuratezza precedente, denotando una maggiore applicabilità dei nodi multi-sensore, in quanto si commettono errori molto bassi.

6 CONCLUSIONI

In questa tesi sono stati affrontati, in particolare, due metodi che hanno l'obiettivo di interpretare i dati provenienti da un sistema di monitoraggio, montato su una struttura in calcestruzzo armato.

Il primo è il metodo polinomiale, il quale sfrutta le misure di curvatura e inclinazione per determinare l'andamento della deformata lungo la lunghezza della trave attraverso una funzione polinomiale di grado n . Le $n+1$ condizioni al contorno sono rappresentate proprio dalle misure di curvatura o inclinazione in alcuni punti della trave, nonché dalle condizioni di compatibilità degli spostamenti con i vincoli.

Questo metodo è stato applicato ai dati sperimentali ottenuti su travi in vera grandezza testate in laboratorio presso il Politecnico di Torino. Dai confronti sperimentali e teorici si sono ottenuti errori minori del 20%. Tali errori, in parte legati all'approssimazione del metodo applicato, in parte imputabili all'effetto della sollecitazione di taglio sulla freccia, possono essere ridotti tenendo conto di quest'ultimo effetto a errori inferiori al 10%.

Al fine di determinare la precisione propria del modello di calcolo della freccia sulla base di misure locali, scorporando l'influenza degli inevitabili errori strumentali, non linearità ecc., si è ripetuta l'analisi dell'errore applicando la metodologia a dati sperimentali fittizi; questi ultimi sono stati desunti sulla base di una modellazione agli elementi finiti. Questa parte di analisi ha dimostrato come la precisione del metodo risulta pari circa al 10% nel caso di schemi isostatici (semplice appoggio, mensola), mentre nel caso di trave doppiamente incastrata l'errore è dell'ordine del 25%. Quest'ultimo, come motivato in letteratura, è dovuto alla forma deformata che cambia concavità, portando ad una minore accuratezza

In commercio sono presenti strumenti di misura con costi contenuti, che si propongono come alternativa ai sistemi tradizionali di monitoraggio, risultando più vantaggiosi dal punto di vista economico e di montaggio, ma vedendo spesso leggermente ridotte le precisioni di misura.

Risulta interessante studiare se le accuratezze di sistemi di monitoraggio di questo tipo possano consentire un'applicazione soddisfacente ai casi più ricorrenti. Per affrontare preliminarmente questo studio si è analizzato l'effetto dell'errore strumentale sul calcolo della freccia; l'analisi agli elementi finiti è stata ripetuta introducendo degli errori noti, ad esempio assumendo valori di errori pari al 2% sui valori di deformazione e pari a 0.05° sui valori di inclinazione, l'errore commesso sul calcolo della freccia è inferiore al 20% per schemi isostatici (semplice appoggio, mensola), mentre per la trave doppiamente incastrata l'errore è superiore al 50%.

Inoltre, si è studiato anche il caso in cui per una trave si perdessero dei punti di misura: anche in questa situazione si ottengono dei buoni risultati, fatta eccezione nel caso in cui si vada ad eliminare la misura di curvatura in mezzeria, dove l'errore è maggiore del 40% circa.

Nella maggior parte dei metodi che si propongono come obiettivo quello di stimare il valore di abbassamento in un punto lungo la sua lunghezza viene trascurato la quota parte di abbassamento dovuta al taglio e viene considerata solo quella dovuta a flessione.

Nell'ambito dell'analisi dei dati sperimentali di laboratorio si è riscontrato un significativo contributo della sollecitazione di taglio sulla freccia, come riscontrato in letteratura in caso di rapporto fra la luce della trave e l'altezza utile L/d inferiore a circa 10 (*Debernardi et al.* in [23, 24, 25]).

Per considerare tale contributo, nella presente tesi è stato impiegato il metodo semplificato e forfettario proposto in *Debernardi et al.* in [23, 24, 25]. In alternativa, è stato proposto il metodo proposto da *Huang et al.* in [29], dove si va a stimare la freccia di alcune travi tenendo conto dell'effetto del taglio. Dall'analisi emerge che il metodo è idoneo per una progettazione preliminare.

L'ultima parte della tesi è stata dedicato all'analisi di un sistema di monitoraggio a basso costo proposto da una start-up del Politecnico di Torino, che si adatta in modo congruente alle metodologie proposte nella tesi.

Sulla base dell'analisi precedentemente effettuata si può concludere che questo sistema low cost ci permette di applicare il metodo polinomiale mantenendo una buona precisione anche nel caso in cui le misure di inclinazione e deformazione sia affette da errori riguardanti l'accuratezza dello strumento.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1: Architettura di un sistema di monitoraggio	8
Figura 2.2: Test radiografico	13
Figura 3.1: Trasduttore elettrico di spostamento.....	16
Figura 3.2: Stazione totale.....	17
Figura 3.3: Prisma di collimazione	18
Figura 3.4: Esempio di LVDT.....	19
Figura 3.5: Esempio di estensimetro elettrico	19
Figura 3.6: Struttura accelerometro.....	20
Figura 3.7: Inclinometro.....	21
Figura 3.8: Sensori di temperatura	23
Figura 3.9: Sensore d'umidità	24
Figura 4.1: Esempio di configurazione di sensori per determinare la curvatura.....	26
Figura 4.2: Deformata del ponte e sezioni critiche dove sono posizionati gli strumenti	28
Figura 4.3: Curvatura di una sezione basata sulle misurazioni degli strain gauges	29
Figura 4.4: Condizioni al contorno per trave semplicemente appoggiata.....	30
Figura 4.5: Sezione della trave (misure in mm)	32
Figura 4.6: Schema statico e posizione dei sensori per il caso 1 (misure in mm).....	33
Figura 4.7: Andamento dell'abbassamento della trave per il caso 1	34
Figura 4.8: Grafico confronto curve con valori esatti, con errore massimo e minimo e valori misurati (caso 1).....	36

Figura 4.9: Schema statico e posizione dei sensori per il caso 2 (misure in mm).....	36
Figura 4.10: Andamento dell'abbassamento della trave per il caso 2.....	37
Figura 4.11: Grafico confronto curve con valori esatti, con errore massimo e minimo e valori misurati (caso 2).....	39
Figura 4.12: Sezione trave TR1-TR3 (misure in mm)	40
Figura 4.13: Schema statico e posizione dei sensori per la TR1 (misure in mm).....	40
Figura 4.14: Andamento della deformata per la trave TR1.....	42
Figura 4.15: Schema statico e posizione dei sensori per la trave TR3 (misure in mm).....	43
Figura 4.16: Andamento della deformata per la trave TR3.....	44
Figura 4.17: Confronto tra l'uso di un polinomio di sesto grado e uno di quinto grado (senza estensimetri in mezzeria) per la TR1.....	46
Figura 4.18: Confronto tra l'uso di un polinomio di sesto grado e uno di quinto grado (senza estensimetri a 6 m) per la TR1	46
Figura 4.19: Confronto tra l'uso di un polinomio di sesto grado e uno di quarto grado (senza estensimetri più esterni) per la TR1	47
Figura 4.20: Influenza percentuale del taglio sulla deflessione in funzione dei rapporti L/d e b/b_w per diversi schemi statici ($f_{ck} = 30$ MPa).....	50
Figura 4.21: Espressioni in forma chiusa per approssimare l'abbassamento di una trave in cemento armato con le tipiche configurazioni di carico	53
Figura 4.22: Grafico carico – freccia per la trave TR1	59
Figura 4.23: Grafico carico – freccia per la trave TR3	59

Figura 5.1: Da sinistra a destra: nodo multi-sensore di spostamento, nodo multi-sensore di deformazione, nodo multi-sensore del potenziale galvanico	62
Figura 5.2: Fasi installazione	65
Figura 5.3: Gateway di trasmissione dati con pannello fotovoltaico per energia solare.....	66
Figura 5.4: Installazione tipica del gateway LoRa	66
Figura 5.5: Architettura sistema LoRa Sysdev.....	67
Figura 5.6: Grafica del software.....	68
Figura 5.7: Visualizzazione dei grafici per i parametri monitorati	68
Figura 5.8: Esempio di visualizzazione CAD 3D per gli elementi monitorati	69
Figura 5.9: Architettura rete LoRaWAN.....	71
Figura 5.10: Nodi multi-sensore sulle pile	72
Figura 5.11: Nodi multi-sensore sull'impalcato.....	73
Figura 5.12: Trave semplicemente appoggiata e posizionamento dei nodi multi-sensori SHBox	74
Figura 5.13: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per la trave semplicemente appoggiata.....	75
Figura 5.14: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave semplicemente appoggiata	78
Figura 5.15: Trave doppiamente incastrata e posizionamento dei sensori.....	78

Figura 5.16: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per la trave doppiamente incastrata	79
Figura 5.17: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave doppiamente incastrata	81
Figura 5.18: Mensola e posizionamento dei sensori	81
Figura 5.19: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per mensola.....	82
Figura 5.20: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la mensola	84
Figura 5.21: Trave semplicemente appoggiata con due carichi concentrati e posizionamento dei sensori.....	85
Figura 5.22: Confronto fra l'andamento della deformata ricavata dal metodo polinomiale, utilizzando i valori esatti di inclinazione e deformazione, e i valori puntuali misurati con il software per trave con due carichi concentrati.....	86
Figura 5.23: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave con due carichi concentrati	88
Figura 5.24: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo	

massimo, e valori misurati per la trave semplicemente appoggiata con accuratezza migliorata	90
Figura 5.25: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave doppiamente incastrata con accuratezza migliorata...	92
Figura 5.26: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la mensola con accuratezza migliorata	93
Figura 5.27: Confronto curve di deformazione ottenute da valori di inclinazione e deformazione esatti, da valori di inclinazione e deformazione affetti da errore positivo massimo e negativo massimo, e valori misurati per la trave con due carichi concentrati con accuratezza migliorata	95

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4.1: Caratteristiche della trave.....	32
Tabella 4.2: Tabella condizioni al contorno per il caso 1 (6 inclinometri)	33
Tabella 4.3: Coefficienti incogniti ricavati attraverso il prodotto matriciale (caso 1)	34
Tabella 4.4: Confronto valori di abbassamento e relativi errori per il caso 1	35
Tabella 4.5: Tabella condizioni al contorno per il caso 2 (3 curvature).....	37
Tabella 4.6: Coefficienti incogniti ricavati attraverso il calcolo matriciale (caso 2)	37
Tabella 4.7: Confronto valori di abbassamento e relativi errori per il caso 2	38
Tabella 4.8: Caratteristiche delle travi TR1 e TR3	40
Tabella 4.9: Condizioni al contorno per la TR1	41
Tabella 4.10: Coefficienti incogniti TR1	41
Tabella 4.11: Condizioni al contorno per la TR3	43
Tabella 4.12: Coefficienti incogniti per la TR3	43
Tabella 4.13: Coefficienti incogniti per la TR1 senza estensimetro in mezzeria.....	45
Tabella 4.14: Coefficienti incogniti per la TR1 senza gli estensimetri più esterni	47
Tabella 4.15: Caratteristiche dei materiali per la TR1	54
Tabella 4.16: Caratteristiche geometriche della TR1	54
Tabella 4.17: Quantità per ricavare la freccia dovuta al taglio per la TR1	55
Tabella 4.18: Caratteristiche dei materiali per la TR3	56
Tabella 4.19: Caratteristiche geometriche della TR3	57
Tabella 4.20: Quantità per ricavare la freccia dovuta al taglio per la TR3	58

Tabella 4.21: Valori di abbassamento misurati e calcolati e relativi errori per la TR1	58
Tabella 4.22: Valori di abbassamento misurati e calcolati e relativi errori per la TR3	59
Tabella 5.1: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la trave semplicemente appoggiata	75
Tabella 5.2: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave semplicemente appoggiata.....	76
Tabella 5.3: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave semplicemente appoggiata.....	77
Tabella 5.4: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la trave doppiamente incastrata.....	79
Tabella 5.5: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave doppiamente incastrata	80
Tabella 5.6: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave doppiamente incastrata	80
Tabella 5.7: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la mensola.....	82
Tabella 5.8: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la mensola.....	83
Tabella 5.9: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la mensola.....	83

Tabella 5.10: Confronto valori di abbassamento misurato e quelli ricavati dai valori esatti di inclinazione e curvatura attraverso il metodo polinomiale e relativi errori per la trave con due carichi concentrati	85
Tabella 5.11: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave con due carichi concentrati.....	87
Tabella 5.12: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave con due carichi concentrati	87
Tabella 5.13: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave semplicemente appoggiata con accuratezza migliorata.....	89
Tabella 5.14: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave semplicemente appoggiata con accuratezza migliorata.....	89
Tabella 5.15: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave doppiamente incastrata con accuratezza migliorata.....	91
Tabella 5.16: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave doppiamente incastrata con accuratezza migliorata.....	91
Tabella 5.17: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la mensola con accuratezza migliorata...	92
Tabella 5.18: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la mensola con accuratezza migliorata ..	92

Tabella 5.19: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore positivo per la trave con due carichi concentrati con accuratezza migliorata..... 94

Tabella 5.20: Confronto fra valori di abbassamento ottenuti con valori esatti di inclinazione e deformazione e valori affetti da errore negativo per la trave con due carichi concentrati con accuratezza migliorata..... 94

APPENDICE A

DATA SHEET NODO MULTI-SENSORE DI DEFORMAZIONE				
		<p>È composto da due parti, inglobate tra loro a formare un unico oggetto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una parte flessibile, in materiale plastico, che incorpora l'elemento sensibile allo STRAIN e una guida termica per la lettura di TEMPERATURA • Una parte rigida (contenitore stagno apribile) contenente l'elettronica del sensore e la batteria intercambiabile 		
DIMENSIONI	PARTE FLESSIBILE	200x35x0,3 mm	Dimensioni parte sensibile allo strain: 150 mm	È totalmente stagna e sigillata e può essere verniciata o ricoperta
	PARTE RIGIDA	98x64x36 mm	È totalmente stagna e sigillata e può essere verniciata o ricoperta da materiali non metallici (per non schermare l'emissione radio). È necessario lasciare accessibile il coperchio per la sostituzione della batteria	
PARAMETRO	RANGE	RISOLUZIONE	ACCURATEZZA	NOTE
Deformazione (strain)	+/- 3%	10 microstrain	È data dalla somma delle seguenti tolleranze: <ul style="list-style-type: none"> • +/- 1 step di risoluzione (10 microstrain) • +/-1% della misura 	Misura bidirezionale eseguita lungo l'asse longitudinale del sensore
Temperatura	-40°C / +125°C	+/- 0,5 °C	+/- 0,5 °C	Aiuta a compensare la deformazione indotta dalla dilatazione termica del substrato
Inclinazione	-	0,05 °	+/- 0,05°	Eseguita con accelerometro triassiale
Accelerazione	+/-2g	-	Rumore tipico di 90µg/√Hz	-
Evento sismico	<p>Il sensore fornisce in output i seguenti parametri:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durata dell'evento sismico, espressa in secondi • Frequenza media dell'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espressa in Hz. • Accelerazione di picco (positiva e negativa) registrata durante l'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espressa in mG • Spostamento di picco (positivo e negativo) registrato durante l'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espresso in mm <p>Contemporaneamente al campionamento dell'accelerazione sui 3 assi, viene fatto un campionamento ad alta frequenza (125 Hz) dello STRAIN, memorizzando il valore massimo raggiunto, sia positivo che negativo. Inoltre, al termine dell'evento sismico, viene fatta una lettura finale di STRAIN e TEMPERATURA, per verificare gli effetti del sisma sulla struttura monitorata</p>			
DURATA BATTERIA	<p>5/7 ANNI con batteria normale 10/14 ANNI con batteria aumentata</p> <p>Nota: nodi multi-sensore su strutture più stabili inviano meno messaggi consumando meno energia</p>			
GRADO DI PROTEZIONE	IP67			
RANGE DI ESERCIZIO	-40°C + 85°C			

DATA SHEET NODO MULTI-SENSORE DI SPOSTAMENTO

	<p>È composto da due parti, inglobate tra loro a formare un unico oggetto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensore di spostamento a pistone • Contenitore stagno apribile contenente l'elettronica del sensore e la batteria intercambiabile 			
DIMENSIONI	PARTE FLESSIBILE	135/185 mm	È totalmente stagna e sigillata	
	PARTE RIGIDA	98x64x36 mm	È totalmente stagna e sigillata e può essere verniciata o ricoperta da materiali non metallici (per non schermare l'emissione radio). È necessario lasciare accessibile il coperchio per la sostituzione della batteria	
PARAMETRO	RANGE	RISOLUZIONE	ACCURATEZZA	NOTE
Deformazione (strain)	0-25 mm	+/- 0,05 mm	+/- 0,05 mm	Misura bidirezionale eseguita lungo l'asse longitudinale del sensore
Temperatura	-40°C / +125°C	+/- 0,5 °C	+/- 0,5 °C	Aiuta a compensare la deformazione indotta dalla dilatazione termica del substrato
Inclinazione	-	0,05 °	+/- 0,05°	Eseguita con accelerometro triassiale
Accelerazione	+/-2g	-	Rumore tipico di 90µg/√Hz	-
Evento sismico	<p>Il sensore fornisce in output i seguenti parametri:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durata dell'evento sismico, espressa in secondi • Frequenza media dell'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espressa in Hz. • Accelerazione di picco (positiva e negativa) registrata durante l'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espressa in mG • Spostamento di picco (positivo e negativo) registrato durante l'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espresso in mm <p>Contemporaneamente al campionamento dell'accelerazione sui 3 assi, viene fatto un campionamento ad alta frequenza (125 Hz) dello STRAIN, memorizzando il valore massimo raggiunto, sia positivo che negativo. Inoltre, al termine dell'evento sismico, viene fatta una lettura finale di STRAIN e TEMPERATURA, per verificare gli effetti del sisma sulla struttura monitorata</p>			
DURATA BATTERIA	<p>5/7 ANNI con batteria normale 10/14 ANNI con batteria aumentata</p> <p>Nota: nodi multi-sensore su strutture più stabili inviano meno messaggi consumando meno energia</p>			
GRADO DI PROTEZIONE	IP67			
RANGE DI ESERCIZIO	-40°C + 85°C			

DATA SHEET NODO MULTI-SENSORE DEL POTENZIALE GALVANICO



È composto da:

- Cavo da saldare alle armature
- Cavo con elettrodo di riferimento Ag/AgCl
- Contenitore stagno apribile contenente l'elettronica del sensore e la batteria intercambiabile

DIMENSIONI	PARTE RIGIDA	98x64x36 mm	È totalmente stagna e sigillata e può essere verniciata o ricoperta da materiali non metallici (per non schermare l'emissione radio). È necessario lasciare accessibile il coperchio per la sostituzione della batteria	
PARAMETRO	RANGE	RISOLUZIONE	ACCURATEZZA	NOTE
Potenziale Galvanico	+/- 1250 mV	10 mV	+/- 10 mV	Riferito a elettrodo standard Ag/AgCl incluso con il nodo multi-sensore
Temperatura	-40°C / +125°C	+/- 0,5 °C	+/- 0,5 °C	Aiuta a compensare la deformazione indotta dalla dilatazione termica del substrato
Inclinazione	-	0,05 °	+/- 0,05°	Eseguita con accelerometro triassiale
Accelerazione	+/-2g	-	Rumore tipico di 90µg/√Hz	-
Evento sismico	<p>Il sensore fornisce in output i seguenti parametri:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durata dell'evento sismico, espressa in secondi • Frequenza media dell'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espressa in Hz. • Accelerazione di picco (positiva e negativa) registrata durante l'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espressa in mG • Spostamento di picco (positivo e negativo) registrato durante l'evento sismico, per ogni asse (X-Y-Z), espresso in mm <p>Contemporaneamente al campionamento dell'accelerazione sui 3 assi, viene fatto un campionamento ad alta frequenza (125 Hz) dello STRAIN, memorizzando il valore massimo raggiunto, sia positivo che negativo. Inoltre, al termine dell'evento sismico, viene fatta una lettura finale di STRAIN e TEMPERATURA, per verificare gli effetti del sisma sulla struttura monitorata</p>			
DURATA BATTERIA	<p>5/7 ANNI con batteria normale 10/14 ANNI con batteria aumentata</p> <p>Nota: nodi multi-sensore su strutture più stabili inviano meno messaggi consumando meno energia</p>			
GRADO DI PROTEZIONE	IP67			
RANGE DI ESERCIZIO	-40°C + 85°C			

DATA SHEET GATEWAY



L'infrastruttura di rete è basata sullo standard LoRa. Prevede l'impiego di GATEWAY dislocati sul territorio, in modo da garantire la necessaria copertura dell'area da monitorare.

DIMENSIONI	GATEWAY	315x170x215 mm
	UNITA' DI ALIMENTAZIONE	252x176x78 mm
	ANTENNA	1m per i GATEWAY da esterno 30 cm per i GATEWAY da interno
RAGGIO MAX DI COPERTURA	AMBIENTE URBANO	2.000 m
	CAMPO APERTO	15.000 m
ALIMENTAZIONE		230 VAC
CONSUMO		3W
POTENZA EMISSIONE		25 mW
MAX NUMERO DI SENSORI GESTIBILI (in condizioni ottimali)		65.000
COMUNICAZIONE GATEWAY-SENSORE		Standard LoRa, protocollo LoRaWAN (868 MHz)
COMUNICAZIONE GATEWAY-CLOUD		3G – Ethernet – Fibra ottica
TEMPERATURA DI ESERCIZIO		-20/+60°C
GRADO DI PROTEZIONE		IP67

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bufarini S., D’Aria V., Giacchetti R., *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura*, Roma, EPC Editore, 2010
- [2] Bufarini S., D’Aria V., Mineo S., Squillacioti D., *Monitoraggio delle strutture. Degradati, dissesti e analisi dei quadri fessurativi*, Roma, EPC Editore, 2010
- [3] Binda L., *Learning from failure, Long-Term behaviour of heavy masonry structures*, Politecnico di Milano, WIT Press, 2008
- [4] Gasparini P. e Ponzo F. C., *Technologies for risk monitoring and emergency management-Development of technologies for the monitoring and seismic risk management, Task at 3.1.3 – Health Monitoring*, Napoli, Doppiavoce, 2015
- [5] Prabhu S., *Structural health monitoring of historic masonry monuments*, Clemson University, TigerPrints, 2011
- [6] Morgenthal G., Höpfner H., The application of smartphones to measuring transient structural displacements, in *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 2, n. 3-4, pp 149-161, 2012
- [7] Habel W.R., SHM systems supporting extension of the structures’ service life, in *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 3, n. 4, pp 225-226, 2013
- [8] Omenzetter P., Mangabhai P., Singh R., Orense R., Prioritisation methodology for application of bridge monitoring systems for quick post-earthquake assessment, in *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 4, n. 4, pp 255-276, 2014
- [9] Le Chang, Ni Wang, Xiao Tan Di, *Brief introduction of technical code for monitoring of public building structure*, China, 2014
- [10] Farrar C. R., Worden K., An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the royal society A* 365, doi: 10.1098/rsta.2006.1928, pp 303-315, 2006
- [11] Juelong Li, Xun Zhang, Ping Wang, Qiliang Yang, Can He, Optical sensor placement for long-span cable-stayed bridge using a novel particle swarm optimization algorithm, in *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 5, n. 5, pp 677-685, 2015
- [12] Ching-you Kao, Xuan-Zhi Chen, Jan J. C., Shih-Lin Hung, Locating damage to structure using incomplete measurements, in *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 6, n. 5, pp 817-838, 2016
- [13] Rucker W., Hille F., Rohrman R., *F08b – Guideline for structural Health Monitoring*, Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), Berlino, 2006

- [14] Fib-Bulletin 22, Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures, CEB-FIP, 2003
- [15] Hong-Nan Li, Liang Ren, Zi-Guang Jia, Ting-Hua Yi, Dong-Sheng Li, State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures, in *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 6, n. 1, pp 3-16, 2016
- [16] Balageas D., *Introduction to Structural Health Monitoring*, chapter 1, in *Structural Health Monitoring*, ISTE, 2006
- [17] Hong-Nan Li, Ting-Hua Yi, Liang Ren, Dog-Sheng Li, Lin-Sheng Huo, Reviews on innovation and applications in structural Health monitoring for infrastactures, in *Structural Monitoring and Maintenance*, v. 1, n. 1, 2014
- [18] Huston D., Data Interpretation, chapter 6, in *Structural Sensing, Health monitoring, and performance evaluation*, USA, CRC Press, 2011
- [19] Huston D., Adaptive and Automated Sensing, chapter 7, in *Structural Sensing, Health monitoring, and performance evaluation*, USA, CRC Press, 2011
- [20] Neves C., *Structural Health Monitoring of the bridges – Model-free damage detection method using Machine Learning*, Licentiate Thesis, Stockholm, Sweden, 2017
- [21] Vurpillot S, Krueger G., Benouaich D., Clément D., Inaudi D., Vertical Deflection of a Pre-Stressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation Sensors and Incliniometer Measurements, in *ACI Structural Journal*, v. 95, n. 5, 1998
- [22] Sousa H., Cavadas F., Henriques A. A., Bento J., Figuerias J., Bridge deflection evaluation using strain and rotation measurements, in *Smart Structures and Systems*, v. 11, n. 4, 2013
- [23] Debernardi P. G., Taliano M., Shear deformation in reinforced concrete beams with thin web, in *Magazine of Concrete Research*, v. 58, n. 3, pp 157-171, 2006
- [24] Debernardi P. G., Taliano M., Guiglia M., Parametric analysis of the influence of shear on the deflection of RC beams in service, in *Magazine of concrete Research*, v. 63, n. 1, pp 1-16, 2011
- [25] Debernardi P. G., Taliano M., Guiglia M., Shear strain in B-regions of the beams in service, in *Engineering Structures*, v. 33, pp 368-379, 2011
- [26] Comité Euro-International du Béton. Fédération International de la Précontrainte (FIP). *Model Code 1990*. Thomas Telford, London, 1993
- [27] Comité Européen de Normalisation. ENV 1992-1-1, *Eurocode 2, Design of Concrete Structures, Part 1, General Rules and rules for buildings*. CEN, Brussels, 1991

- [28] American Concrete Institute. *Building code requirements for reinforced concrete, ACI 318-95M and commentary*. American Concrete Institute, Detroit, 1995. ACI Committee 318
- [29] Zheng Huang, Yongming Tu, Shaoping Meng, Ulf Ohlsson, Björn Täljsten, Lennart Elfgren, *A practical computational method for predicting shear deformation of reinforced concrete beams*, articolo in fase di pubblicazione
- [30] American Concrete Institute. *Building code requirements for reinforced concrete, ACI 318M-14 and commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2014
- [31] Fib, *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2010
- [32] Cosenza E., Greco C., *Il calcolo delle deformazioni nelle strutture in cemento armato*, Napoli, CUEN, 1991

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il *Prof. Maurizio Taliano* e l'*ing. Matteo Guiglia* per l'impegno profuso nel seguirmi e accompagnarmi in questi mesi, aiutandomi e fornendomi il materiale per la realizzazione di questa tesi.

Ai miei *genitori*, che sono il mio punto di riferimento e che mi hanno sostenuto sia economicamente che emotivamente e che mi hanno permesso di percorrere e concludere questo cammino e raggiungere il mio sogno fin da quando ero bambino. Grazie a *mio padre*, il mio "professore" personale, che mi ha insegnato tanto e mi ha permesso di avere un vantaggio in questo percorso rispetto ai miei colleghi. Mi ha insegnato ad essere caparbio e raggiungere gli obiettivi che mi ero imposto senza tirarmi mai indietro, perché le cose si dimostrano con i fatti non con le parole. Grazie a *mia madre* che ogni giorno mi spronava ad andare avanti, e che dopo ogni esame gioiva per i miei successi e se qualcosa andava storto mi spronava a dare di più.

Grazie a mio fratello, *Giuseppe*, che a modo suo mi ha sempre sostenuto, aiutandomi quando ne avevo bisogno. Oggi ho raggiunto questo obiettivo, che non è solo mio, ma nostro, perché dobbiamo portare avanti, e sempre più su, l'azienda di famiglia per essere i migliori sempre.

Grazie perché senza di voi non sarei mai arrivato fino in fondo a questo difficile, lungo e tortuoso cammino. Questa tesi la dedico a voi che siete la mia famiglia, la mia guida e il mio più grande sostegno.

Voglio ringraziare una persona unica e speciale, *Francesca*, la mia fidanzata, che in questi ultimi due anni del mio percorso mi è stata accanto anche se a 1200 km di distanza, donandomi affetto e amore. Ha gioito con me per i risultati raggiunti e mi ha consolato nei periodi difficili, supportandomi sempre, ma anche sopportandomi nei miei giorni "no", quando non avrei voluto parlare con nessuno, ma alla fine aspettavo sempre la sua telefonata quotidiana riuscendo a strapparmi sempre un sorriso alla fine. Questi due anni sono stati difficili, sia per la lontananza sia per le incomprensioni che a volte nascevano, ma da oggi potremo viverci di più e guardare avanti insieme, partendo da questa vittoria, rendendoti sempre orgogliosa di me.

Grazie a mia *nonna Maria*, che mi ha sempre sostenuto in questo percorso, chiamandomi ogni fine settimana, sia per sapere come stavo sia per ricordarmi quanto mancava al mio ritorno a casa, consolandomi che sarebbe mancato poco.

Ai miei nonni *Giuseppe, Raffaella e Serafino* (anche se non l'ho mai conosciuto di persona), che oggi non possono essere qui con me, ma spero che mi guardino sempre da Lassù e che siano orgogliosi di me e dei miei traguardi.

Grazie ai miei zii *Filomena e Antonio* e ai miei cugini *Tonia, Alessandro, Marianna, Francesco, Luisa e Angelica* per avermi fatto passare molti weekend in compagnia e per avermi fatto sentire come se fossi a casa quando avevo bisogno di rompere dalla monotonia della mia vita universitaria a Torino.

Un grazie speciale va ai miei colleghi, ma ormai amici molto cari, del gruppo degli *In(g)civili*, che mi hanno accolto nel gruppo e con cui abbiamo condiviso le gioie e i dolori di “questo posto”. Grazie a *Silvia*, la donna del gruppo, i suoi appunti mi hanno permesso di superare gli esami più difficili di questo percorso. Grazie a *Enrico e Fabian*, con cui abbiamo condiviso la realizzazione di molti progetti durante il nostro percorso di studi. Grazie a *Luca e Paolo*, per aver reso meno pesante il mio ultimo semestre di lezioni, con annessi commenti a chiunque passava, e per le pause pranzo “leggere” al sushi. Grazie a *Marco e Pasquale*, salentini come me (anche se Pasquale dice che io non lo sono), con cui abbiamo condiviso tante risate e con il loro accento mi riportavano con la mente a casa. Grazie a *Renato*, un ragazzo dal cuore grande sempre pronto ad aiutare chiunque ne avesse bisogno. Grazie a *Matteo*, ormai il mio compagno di Laurea, che con la sua passione per gli stadi ha influenzato un po' tutti. Grazie a *Francesco*, juventino vero e capace di dare sempre buoni consigli.

Grazie agli “*Amichi Torino*”: *Lucia, Carmen, Francesco e Mino* con i quali ho trascorso questi bellissimi anni di università. Ci siamo trasferiti a Torino e siamo stati fin da subito il punto di riferimento l'uno per l'altro, passando tante serate insieme a chiacchierare, ridere e scherzare. Grazie per tutti i pranzi, le cene e i compleanni passati insieme, soprattutto per il mio che capita sempre in piena sessione d'esami.

Un grazie ai miei amici: *Simona, Gabriele, Federica e Cosimo*, che anche se sparsi in tutta Italia ci siamo supportati a vicenda nel raggiungimento dei nostri obiettivi e per i momenti di svago passati insieme.

Infine, vorrei ringraziare tutti i parenti, amici e colleghi che hanno sempre creduto in me chiamandomi Ingegnere fin da quando questo era solo il sogno di un bambino, spronandomi a raggiungere il mio obiettivo.