



**SCUOLA DI DOTTORATO**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI *MEDITERRANEA* DI REGGIO CALABRIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, DELL'ENERGIA, DELL'AMBIENTE E DEI MATERIALI - DICEAM

DOTTORATO DI RICERCA IN  
INGEGNERIA CIVILE AMBIENTALE E DELLA SICUREZZA  
S.S.D. ICAR/06  
XXXIII CICLO

# **TECNICHE DI GEOMATICA E DI SOFT COMPUTING PER IL MONITORAGGIO DEL TERRITORIO E DEL COSTRUITO**

DOTTORANDO:  
**Ing. Antonino Fotia**

TUTOR:  
**Prof. Vincenzo Barrile**

COORDINATORE:  
**Prof. Felice Arena**



ANTONINO FOTIA

**TECNICHE DI GEOMATICA E DI SOFT COMPUTING PER IL  
MONITORAGGIO DEL TERRITORIO E DEL COSTRUITO**



## Indice

<b>3</b>	<b>Introduzione</b>
<b>9</b>	<b>I. Ponti e viadotti: processo di ispezione e manutenzione</b>
<b>11</b>	Condizioni delle opere in Italia
<b>12</b>	Elementi Costitutivi di un ponte
<b>14</b>	Tipologia Ispezioni
<b>15</b>	Il monitoraggio SHM
<b>16</b>	Bibliografia
<b>19</b>	<b>II. Droni: Ausilio all'indagine visive e modellazione 3D</b>
<b>21</b>	Ispezione e manutenzione delle opere d'arte stradali
<b>21</b>	Breve storia dei veicoli aerei senza equipaggio
<b>25</b>	Definizione e descrizione degli UAS
<b>31</b>	Sensori
<b>32</b>	Metodi di controllo
<b>34</b>	Classificazione UAS
<b>36</b>	Regolamento UAV
<b>42</b>	Applicazione in AEC (Ingegneria e Costruzione dell'Architettura)
<b>48</b>	Applicazione in ingegneria e costruzione dell'architettura
<b>54</b>	Bibliografia
<b>57</b>	<b>III. Indagine strumentale: sensori e strumenti di acquisizione dati</b>
<b>59</b>	Tecniche d'indagine per il monitoraggio e l'ispezione
<b>60</b>	Approccio di rilevamento diretto
<b>62</b>	Approccio di rilevamento indiretto
<b>64</b>	Fotogrammetria aereo e SFM-MVS per il rilevamento
<b>66</b>	I sistemi di monitoraggio
<b>66</b>	Il sistema di rilevamento: i sensori
<b>68</b>	Carichi naturali e artificiali
<b>70</b>	Risposta strutturale
<b>74</b>	Bibliografia
<b>75</b>	<b>IV. Il metodo sperimentale di indagine proposto per il monitoraggio di infrastrutture: il sistema previsionale e l'Early Warning</b>
<b>81</b>	Acquisizione dati da sensori
<b>82</b>	Acquisizione dati GPS con sistemi low cost e correzione errori

<b>86</b>	Considerazioni sull'eventuale uso del Sensore di spostamenti veloci Vadase
<b>87</b>	Trasmissione dati da sensori a sistema di elaborazione
<b>89</b>	Costruzione del modello strutturale finale: integrazione del modello strutturale con la geometria e i dati acquisiti da sensori
<b>91</b>	Applicazione tecniche soft computing per la stima del comportamento dell'infrastruttura
<b>102</b>	Piattaforma di Visualizzazione
<b>104</b>	Bibliografia
<b>107</b>	V. Applicazione della metodologia proposta a casi reali
<b>120</b>	Rilievo UAV (Modellazione 3d ed estrazione automatica della geometria della infrastruttura)
<b>126</b>	Il sistema di rilevamento con sensori
<b>136</b>	Modello Strutturale e Modellazione 3d per la produzione di un Modello "Finale"
<b>143</b>	Soft computing analysis per la realizzazione di un modello previsionale del comportamento della infrastruttura nel tempo e sua visualizzazione su piattaforma
<b>151</b>	Bibliografia
<b>157</b>	Conclusioni

La nostra società dipende fortemente da numerose infrastrutture critiche complesse e interdipendenti. Eventuali carenze (interruzioni o riduzione del traffico veicolare) nella funzionalità della rete di trasporto possono causare enormi disagi alle comunità e alle persone. Il sistema di trasporto è, infatti, necessario per la salute e la funzionalità della società moderna, da cui dipende non solo per la mobilità quotidiana delle persone e per il trasporto merci, ma anche come ancora di salvezza per la gestione delle emergenze. (Capitolo 1)

Il patrimonio infrastrutturale di trasporto italiano, sia in termini di rete esistente che di opere infrastrutturali, è talmente significativo che il problema della sua sicurezza e conservazione è diventato sicuramente una priorità per il nostro Paese, tuttavia come ormai ben noto dai fatti di cronaca, la maggior parte dei ponti e viadotti italiani presenta un certo grado di ammaloramenti, in alcuni casi molto avanzato, in considerazione anche al fatto che la maggior parte degli stessi sono stati costruiti ormai circa 50 anni fa.

Ad oggi, la procedura seguita per determinare lo stato di manutenzione di ponti e viadotti prevede una prima ispezione visiva da parte di personale specializzato e, ultimamente, l'avvento dei droni ha facilitato tale operazione, permettendo una analisi molto più dettagliata abbattendo i costi e i tempi necessari per l'analisi. (Capitolo 2)

D'altra parte è bene sottolineare, che le infrastrutture in Italia sono in uno stato generale di necessità e avversione, principalmente a causa della quasi totale mancanza di un meccanismo centrale di controllo e monitoraggio dei rischi.

Ad oggi i sistemi di monitoraggio possono essere suddivisi in :

- Sistemi di monitoraggio tradizionali
- Sistemi di monitoraggio innovativi

I sistemi di monitoraggio tradizionali sono caratterizzati dal fatto che::

- I dati vengono acquisiti dalla strumentazione e archiviati;
- Si verifica che le grandezze acquisite rientrino nei valori di soglia impostati;
- Il report di monitoraggio è limitato ai valori che le grandezze fisiche hanno avuto nel tempo
- L'interpretazione dei dati è data a consulenze specialistiche;
- Non ci sono informazioni sulla coerenza tra comportamento atteso e misurato della struttura;

A seguito di eventi eccezionali, è necessaria dunque la consulenza di uno specialista per capire se il comportamento resistente dell'infrastruttura è cambiato in modo significativo.

In questo contesto, il sistema di monitoraggio può essere un onere per l'istituzione a fronte di scarsi vantaggi. (Capitolo 3)

Per ridurre al minimo il numero di ispezioni da parte di personale specializzato dunque una possibile soluzione potrebbe essere quella della installazione di sistemi di monitoraggio in continuo. Tuttavia la generale tendenza ad “economizzare” in fase di progettazione escludendo quindi le metodologie di cui sopra, non tiene per nulla in considerazione che i costi di post-intervento necessari per porre rimedio ad eventuali criticità presenti sono molto più elevati rispetto ai potenziali “risparmi” che si otterrebbero adottando preventivamente una metodologia in grado di valutare il comportamento delle infrastrutture nel tempo (monitoraggio in continuo).

In quest’ottica la società sta rimodernando il concetto di progettazione degli spazi antropici, rimodernando e costruendo le “smart cities” che ormai sono una realtà in cui si trova un utilizzo ottimizzato di tutte le risorse che contribuiscono a garantire sviluppo e crescita, in diversi settori e ambiti. (Capitolo 4). Infatti la definizione di Smart City introduce, accanto al concetto di "intelligente", anche quello di "sostenibile": una città intelligente e sostenibile è un nucleo urbano che utilizza le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) e altri mezzi tecnologici ("sensori" e tecniche di soft computing) per migliorare la qualità della vita, l'efficienza dei servizi e l'attività urbana, la competitività, nel rispetto delle esigenze delle generazioni presenti e future dal punto di vista economico, sociale e ambientale. Non solo quindi un concentrato di tecnologie, ma un ecosistema complesso a cui devono partecipare attivamente cittadini, autorità comunali, aziende locali, industrie in genere oltre alle diverse comunità e gruppi di interesse.

In questo ambito, i mezzi tecnologici da utilizzarsi sono caratterizzati come detto essenzialmente e prevalentemente dal “sensore” e dalle tecniche di “soft computing”

il “sensore” da adattarsi alla complessità della smart city e’ caratterizzato da due aspetti:

- la capacità di rilevare in modo accurato i dati fisici.
- la capacità di svolgere direttamente alcune funzioni informatiche, magari utilizzando tecniche di intelligenza artificiale. (Capitolo 5) .

Ciò diventa essenziale per generare informazioni già correttamente interpretate e di conseguenza diminuire l'immenso volume di dati che altrimenti potrebbe crescere a livelli tali da diventare gestibile solo con costi e risorse significativi.

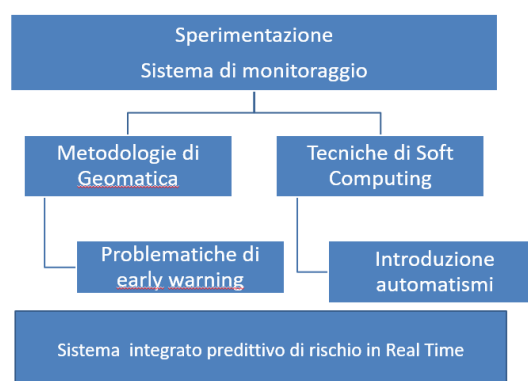
Le ormai collaudate tecniche della Geomatica applicate con successo in vari settori applicativi possono sicuramente fornire un ottimo contributo alle tematiche di cui sopra soprattutto se affiancate da valide e performanti infrastrutture per la comunicazione e la trasmissione dei dati da considerarsi come lo scheletro che fa funzionare il sistema.



Tenendo presente queste iniziali considerazioni, nella presente tesi si è voluto appunto sperimentare un sistema che integri le due metodologie (Geomatica e Soft Computing) al fine di produrre un sistema finalizzato da un lato a risolvere problematiche di early warning, e dall'altro in grado di generare un sistema previsionale sul comportamento della infrastruttura nel tempo sfruttando principalmente parametri geomatici. La sperimentazione sviluppata combina dunque tecniche geomatiche e di soft computing da un lato per monitorare il territorio e il costruito (rendendo così più "sostenibili" le nostre città, sfruttando il continuo sviluppo tecnologico degli strumenti di raccolta ed elaborazione dati), e dall'altro per valutare con sempre maggiore chiarezza le caratteristiche strutturali e il livello di danneggiamento di un'opera, consentendone la previsione dell'andamento delle sue caratteristiche nel tempo.

Le attività che si sono portate avanti nella presente tesi (sistemi innovativi di monitoraggio) tentano quindi di superare i limiti del monitoraggio tradizionale e ben si inseriscono dunque nel contesto odierno delle smart cities finalizzate alla sperimentazione di un innovativo sistema predittivo di rischio in real time, capace di allertare i soggetti preposti in caso di pericoli imminenti o di early warning. (Capitolo 4)

A tal fine, quindi si è voluto da un lato finalizzare l'uso delle tecnologie geomatiche (integrate anche dall'utilizzo di sensori in loco) a problematiche di early warning, e dall'altro attraverso tecniche di soft computing introdurre automatismi nella raccolta, elaborazione e previsione di dati (fig.1) al fine di produrre un sistema predittivo in grado di monitorare lo stato della infrastruttura prevedendo eventuali sue criticità nel tempo.



**Figura 1**– Flow chart esplicativo idea Sistema integrato predittivo di rischio in Real Time.

Il sistema predittivo integrato/early warning proposto si basa dunque sulla realizzazione e integrazione iniziale di più modelli (geometrici / strutturali) rappresentativi dell'oggetto di studio (infrastruttura) al fine

di produrre un modello “tipo” finale considerando al suo interno diverse condizioni di carico dell’infrastruttura:

- Un modello 3D rilevato da drone (scenario geometrico 0),
- un modello strutturale all’istante 0 (analisi strutturale istante 0)
- Un modello “tipo” finale integrazione dei due modelli precedenti sul quale vengono variate più condizioni al contorno (alcune derivate da condizioni reali della infrastruttura e altre simulate su software) per simulare altrettanti scenari (scenario n).

Successivamente i risultati ottenuti dai vari scenari vengono implementati in una rete neurale (tecniche di Soft computing) facendo sì che il sistema predittivo integrato proposto richieda in input solo spostamenti (statici e dinamici), acquisibili dai “sensori” posizionati sulla infrastruttura per produrre differenti livelli di rischio.

Infatti, una volta addestrata la rete neurale, i dati simulati relativi alle condizioni al contorno vengono sostituiti con i dati acquisiti da un opportuno sistema di monitoraggio (Sensoristica) basato sull’utilizzo di tecniche di Geomatica e di sensori per la stima degli spostamenti.

I dati acquisiti dai sensori sul campo vengono quindi trasmessi ad una centralina opportunamente progettata che provvede a inviarli ad un server di elaborazione dove è implementato tutto il sistema di calcolo (modello 3d – modello strutturale – dati provenienti dai sensori di spostamento – rete neurale previsionale – sistema di early warning – sistema di visualizzazione dei risultati ). che elabora la totalità dei dati ricevuti visualizzando i risultati su piattaforma Wordpress con delle colorazioni differenti in funzione delle soglie di rischio calcolate.

La sperimentazione del sistema predittivo integrato proposto (capitolo 5) è stata effettuata su:

- Viadotto “Annunziata” a Reggio Calabria (Sud Italia), già utilizzato come caso studio nell’ambito di altre attività di ricerca di geomatica condotto dal laboratorio di Geomatica del DICEAM dell’Università Mediterranea di Reggio Calabria
- Viadotto di collegamento tra Palmi e Gioia Tauro

al fine di testare la validità su due casi reali sia in termini di early warning che di previsione del comportamento delle infrastrutture nel tempo.

Il lavoro di tesi realizzato (composto da una parte teorica iniziale ed una parte applicativa) si articola dunque in cinque capitoli, come di seguito sintetizzato:

*Capitolo 1- Stato dell’arte e processo di ispezione e manutenzione delle infrastrutture*

Nel primo capitolo si introduce lo stato dell'arte delle diverse tipologie di infrastrutture e dei diversi processi di gestione, ispezione e manutenzione delle stesse

*Capitolo 2- Droni come ausilio all'indagine visiva e modellazione 3D.*

Il secondo capitolo è dedicato agli strumenti che ormai hanno velocizzato e semplificato le operazioni di ispezione delle infrastrutture e alle tecniche di modellazione 3D (fotogrammetria) applicate alle immagini fornite dai droni dopo opportuna progettazione di volo in funzione della diversa tipologia di infrastruttura.

*Capitolo 3- Indagine strumentale: sensori e strumenti di acquisizione dati*

Il terzo capitolo presenta una breve introduzione generale sulle tecniche di monitoraggio e controllo, e prevenzione/early warning ad oggi utilizzate con particolare attenzione alla sensoristica utilizzata.

*Capitolo 4- Metodologia di indagine proposta*

Nel quarto capitolo si presenta nel dettaglio il sistema integrato proposto in tutte le fasi, con particolare riferimento all'integrazione delle metodologie della Geomatica e della Soft Computing al fine di produrre un sistema che presenti vantaggi in termini predizione del comportamento dell'infrastruttura (consentendo di tenere in tempo reale sotto controllo, anche a distanza, oscillazioni, cedimenti e variazioni strutturali e d'intervenire in caso di necessità). rispetto a quanto utilizzato e presente ad oggi sul mercato.

*Capitolo 5- Applicazione della metodologia proposta a casi reali.*

Nell'ultimo capitolo è sviluppata e presentata l'applicazione della metodologia proposto su due strutture reali.



CAPITOLO I



## 1. Ponti e viadotti: processo di ispezione e manutenzione

I ponti sono sicuramente tra le strutture più importanti di qualsiasi rete autostradale. Durante la loro vita di servizio, essi sono soggetti a deterioramento che può ridurre la loro sicurezza e funzionalità. Il problema principale della manutenzione dei ponti è dato dalle limitate risorse economiche da impegnare agli interventi, che dovranno quindi essere adeguatamente ripartiti fra tutti i ponti della rete stradale tramite un certo grado di priorità. L'amministrazione del nostro paese manca infatti di strumenti che semplificano la gestione di tali opere, rendendo impossibile una programmazione efficiente delle attività manutentive da eseguire. Tali necessità hanno quindi portato alla creazione di quelli che vengono chiamati Bridge Management System (BMS). Tali software, tramite l'utilizzo di una serie di dati ricavati dalle ispezioni visive, permette di ricavare lo stato di salute del ponte e di tutti i suoi elementi, e tramite degli algoritmi di degrado prevedere lo stato di salute del ponte con il passare del tempo. Un'altra fondamentale caratteristica è la creazione di una lista di priorità, mettendo in cima alla lista tutti i ponti che necessitano di manutenzione immediata. L'uso di un metodo per la definizione delle priorità per la manutenzione dovrebbe aiutare le autorità con limitate risorse economiche, garantendo una migliore ripartizione delle stesse negli elementi con maggiore urgenza.

### 1.1 Condizioni delle opere in Italia

L'Italia, possedendo un'orografia del territorio particolarmente complessa, ha sempre avuto la necessità di un grande numero di opere viarie quali ponti e viadotti. Per questo, a oggi, i numeri delle infrastrutture di trasporto relativi alle reti autostradali sono particolarmente importanti. I ponti e viadotti, con un numero di 1.068 opere complessive, coprono una lunghezza di 1.013 km su un totale di circa 6.000 km di rete. Se invece si va a considerare tutta la rete stradale italiana con una lunghezza complessiva di 38.000 km, allora le opere salgono a ben 61.000, il maggior numero dei quali sono inoltre stati costruiti in assenza di norme che tenessero conto di diversi concetti ormai ben consolidati, quali durabilità del materiale, programma di manutenzione, etc. A causa di tali motivazioni, negli ultimi due decenni abbiamo assistito al crollo di numerose opere d'arte.

Il problema dei ponti in Italia riguarda soprattutto i ponti di vecchia realizzazione, risultando particolarmente complessa la loro manutenzione a causa dei seguenti motivi:

- La gestione dei ponti viene delegata agli Enti Locali, quali Province e Regioni, da parte dello Stato. Questo comporta una frammentazione delle informazioni di tutte le opere d'arte. Oltretutto, tali enti molto spesso non possiedono un database delle

strutture sotto la loro giurisdizione, ma soltanto di dati sotto forma cartacea di difficile consultazione.

- Il numero delle opere d'arte catalogate risulta molto limitato, e quelle poche possiedono soltanto informazioni superficiali e poco accurate.
- La mancanza di un protocollo unico per la gestione e la manutenzione rende quasi impossibile la coordinazione fra i vari enti gestori. Questo si riflette anche sulla qualità delle ispezioni, ormai basate su semplici ispezioni visive senza il supporto protocolli standardizzati ed eseguite da personale che, in molti casi, non possiede le conoscenze tecniche adeguate.
- La difficoltà di scegliere una distribuzione adeguata del, sempre più limitato, budget a disposizione degli enti gestori, che a causa dei problemi sopra elencati non riescono a definire una corretta lista di priorità da seguire, tralasciando magari opere che richiedono una manutenzione più immediata.
- Molto spesso il controllo di una vasta area della rete viaria viene affidata a pochi individui, che con poche risorse devono riuscire a garantire il mantenimento di un adeguato livello di sicurezza.

Da queste motivazioni risulta evidente come la creazione di tool che permettano di capire il comportamento dell'infrastruttura in modo predittivo risulti necessario per riuscire a effettuare una corretta distribuzione del budget a disposizione.

### 1.2 Elementi Costitutivi di un ponte

Le parti di un ponte vengono classificate in quattro diverse categorie:

- Sovrastruttura: in generale, la sovrastruttura rappresenta la porzione di ponte che si trova sopra gli appoggi, come mostrato nella seguente figura. Nella sovrastruttura sono comprese tutte le parti sostenute dagli appoggi, tra cui l'impalcato, le travi, etc.. L'impalcato, formato dall'insieme delle strutture orizzontali che realizzano il piano stradale, ha lo scopo di sostenere i carichi dovuti al traffico. Tali carichi sono trasferiti alla sottostruttura attraverso specifici apparecchi di appoggio.
- Appoggi: gli appoggi sono la componente del ponte che ha il compito di trasmettere il carico ricevuto dalla sovrastruttura e trasmetterlo alla sottostruttura e permettere movimenti dovuti alle variazioni termiche e alle azioni sismiche. Essi possono essere visti come il confine fra sovrastruttura e sottostruttura.
- Sottostruttura: la sottostruttura è la porzione del ponte che si trova sotto gli appoggi, la quale ha il compito di sorreggere la sovrastruttura e trasferire tutti i carichi al terreno. In questa categoria sono quindi comprese pile, spalle e tutte le tipologie di fondazioni. Sia le spalle che le pile sono strutture verticali che hanno il compito di sopportare il carico trasmesso dagli appoggi, o direttamente dalla sovrastruttura, e trasferirlo alle fondazioni. Le



spalle sono posizionate all'inizio e alla fine del ponte, mentre le pile sono dei supporti intermedi.

- Elementi accessori: gli elementi accessori dipendono direttamente alla struttura principale del ponte, e comprendono parapetti, condotte di servizio, etc. Il peso proprio di tali elementi deve essere considerato durante la progettazione della struttura, ma le loro capacità portante viene generalmente ignorata.

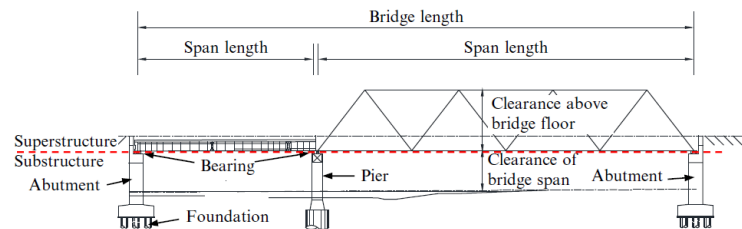


fig. 1. Componenti della sovrastruttura

Nel particolare un infrastruttura consta principalmente di:

- *Impalcato* che è la carreggiata o la passerella pedonale, in genere gettato in situ oppure prefabbricato, ricoperto con asfalto o altri tipi di pavimentazione. L'impalcato in calcestruzzo può essere parte integrante della struttura del ponte (per esempio travi con sezione a T), oppure può essere appoggiato su travi a sezione ad I o delle reticolari in acciaio (strutture composite). Il suo comportamento cambia in base alla tipologia del ponte. Nei ponti sospesi, infatti, l'impalcato è un elemento strutturale primario che deve essere in grado di sopportare tutte le tensioni agenti lungo la campata. Invece, nei ponti a travata, esso non è il sistema di carico principale. Nonostante questo, l'impalcato è importante per la manutenzione del ponte, per la sicurezza e per la sua estetica. Per questo, a esso è riservata una particolare attenzione nelle fasi di progettazione e costruzione. In esso sono presenti diversi elementi accessori, quali sistemi di drenaggio, giunti di espansione, marciapiede, lampioni, corrimano e guardrail.
- *Pile* che sono delle sottostrutture, in calcestruzzo armato, posizionate alla fine delle campate di un ponte in punti intermedi fra le spalle. Il compito delle pile è quello di trasferire il carico verticale della sovrastruttura alle fondazioni, e resistere a tutti le forze orizzontali che agiscono sul ponte. Essendo uno degli elementi maggiormente a vista, essi contribuiscono in modo importante all'estetica del ponte. Ne esistono diverse tipologie, ma quelle più comuni sono quelle singole oppure a telaio. Le prime sono costituite da un unico elementi che supporta la sovrastruttura, mentre la seconda

tipologia è costituita da diversi pilastri, allineati lungo l'asse maggiore della pila e collegati tramite un pulvino.

- *Fondazioni*, che sono una delle parti strutturali di maggior importanza di un ponte. Esse si trovano sotto le pile e le spalle, e hanno il compito di trasferire il carico dalle pile e dalle spalle al terreno. Devono essere progettate per sopportare i carichi statici e dinamici della struttura, la pressione della terra ed eventualmente quella dell'acqua.
- *Spalla*, che è un elemento molto importante di un ponte, infatti ha il compito di trasferire i carichi dalla sovrastruttura al terreno. In generale, le spalle sono elementi in calcestruzzo, molto massicci, in quanto devono avere abbastanza capacità portante da resistere a tutti i problemi di stabilità, tra cui: slittamento, ribaltamento e cedimento. Essi sono progettati per sostenere la pressione del terreno e il peso della sovrastruttura del ponte.

### 1.3 Tipologia Ispezioni

Gli attuali metodi di valutazione delle condizioni utilizzano due approcci diversi sia per le valutazioni dei singoli elementi che per la valutazione della struttura nel suo insieme. Nel primo caso viene utilizzata una valutazione cumulativa derivata dalla condizione di ogni singolo elemento, mentre nel secondo caso viene utilizzata la come valutazione complessiva quella dell'elemento nelle condizioni peggiore.

Il degrado della struttura solitamente inizia dal punto più debole, per esempio nella zona attorno ai sistemi di drenaggio o nell'area sottostante i giunti di dilatazione. Sono quindi necessarie delle prove visive di tale degrado, come fessurazione superficiale e zone umide. Il problema è che tali fenomeni sono facilmente riconoscibili negli elementi più esposti del ponte, ma non così facilmente ricavabili in quelli più nascosti.

Per fare fronte a tali problemi, sono state ideate diverse tipologie di ispezioni. Esse si dividono in:

- Ispezioni superficiali utili a fornire solo una prima stima dello stato di salute degli elementi e catalogare i principali difetti sulla superficie visibile, ed effettuate da personale non specializzato (spesso addetti alla manutenzione).
- Ispezioni generali, ispezioni visive ma condotte da personale specializzato•
- Ispezioni principali ispezioni strumentali condotte da personale specializzato•
- Ispezioni approfondite e speciali, finalizzate a verificare, tramite l'ausilio di attività sperimentali, che la causa del danno sia chiara e garantire una riparazione efficiente

#### 1.4 Il monitoraggio SHM

Il monitoraggio strutturale, noto anche come structural health monitoring (SHM), è uno dei più recenti e interessanti campi di studio dell'ingegneria strutturale. Esso rende possibile, sfruttando il continuo sviluppo tecnologico di strumenti di rilevazione ed elaborazione dati, valutare con sempre maggior chiarezza le caratteristiche strutturali e il livello di danneggiamento di una qualunque opera, consentendo al professionista di predirne l'andamento nel tempo. Il monitoraggio strutturale può rivestire un ruolo fondamentale nello scenario infrastrutturale italiano, ricco di un patrimonio immobiliare articolato e vasto, in un'epoca caratterizzata da una maggiore sensibilizzazione dell'opinione pubblica nei confronti della sicurezza strutturale, causata dalle numerose e tristi catastrofi che hanno colpito profondamente il cuore sociale ed economico del Paese. Monitorare lo stato di salute di una struttura significa aumentarne il livello di sicurezza nelle sue diverse fasi di vita, dalla realizzazione all'abbattimento. Implementare un sistema di monitoraggio ad esempio rende possibile, alle autorità competenti, l'individuazione delle criticità e una loro categorizzazione. La realizzazione di un archivio, continuamente aggiornato con i dati rilevati, permette infine di ottimizzare l'impiego delle risorse e migliorare la qualità degli interventi da programmare.

Il monitoraggio strutturale si basa sull'interazione di tecniche di rilevamento e modelli matematici. Le ipotesi alla base dei modelli matematici sono quelle che costituiscono la spina dorsale della scienza delle costruzioni e vantano, per tanto, una traduzione letteraria ampia e variegata. In questa sede si richiameranno esclusivamente le ipotesi utilizzate dalle teorie che verranno introdotte nei prossimi paragrafi. La continuità nel tempo del monitoraggio è infine la caratteristica peculiare che differenzia questa disciplina da una sporadica misurazione di dati, rendendo possibile la registrazione delle variazioni dei principali fattori d'interesse

Si riporta pertanto una lista dei principali obiettivi che questa ormai fondamentale pratica ingegneristica si pone di perseguire :

- Monitorare le condizioni di carico di una struttura;
  - Valutare il comportamento strutturale in diverse condizioni di carico;
  - Verificare e aggiornare i criteri usati in fase di progetto;
  - Individuare il danneggiamento;
  - Guidare all'ispezione e alla manutenzione; Il monitoraggio strutturale è inoltre uno dei principali strumenti che permettono all'ingegnere strutturale di assicurare un accettabile livello di sicurezza durante le fasi di adeguamento e consolidamento di un'opera
- 
- L'SHM è una complessa pratica ingegneristica generata dall'unione di diversi strumenti tecnologici. Un sistema di

monitoraggio è costituito in generale dai seguenti sistemi : • Sistema di sensori: misurano le grandezze d'interesse; • Sistema di acquisizione e trasmissione dati: dispositivi che ricevono i segnali generati dai sensori, li convertono e li trasmettono ai computers per l'elaborazione; • Sistema di controllo ed elaborazione dati: controllano le operazioni del sistema di acquisizione ed elaborano i dati ricevuti; • Sistema di gestione e archivio dati: archiviano i risultati dell'elaborazione per consentire analisi successive; • Sistema di valutazione strutturale; I primi due sistemi sono generalmente installati sulla struttura, gli altri invece sono dislocati all'interno degli uffici di controllo del gestore dell'infrastruttura<sup>9</sup> . Tutti questi sistemi permettono all'ingegnere strutturale di inquadrare lo stato di integrità di una struttura.

## Bibliografia

- Alho, P., Kukko, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Jaakkola, A. (2009). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.1879>
- Berenyi, A., Lovas, T., & Barsi, A. (2010). Terrestrial Laser Scanning - Civil Engineering Applications. *Proceedings of the Isprs Commission V Mid-Term Symposium Close Range Image Measurement Techniques*, 38(5), 80–85.
- Brasington, J., Rumsby, B. T., & McVey, R. A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 973–990. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y)
- Brasington, James, Langham, J., & Rumsby, B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53(3–4), 299–316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)
- Brook, M. (2017). *Structure from motion in the geosciences*. *New Zealand Geographer* (Vol. 73). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1111/nzg.12161>
- Buckle, I., Friedland, I., Mander, J., Geoffrey, M., Nutt, R., & Power, M. (2006). Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges. *Fhwa*, (January). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)73946-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)73946-5)
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V. R., & Rico, M. (2006). The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.1278>
- Cryderman, C., Mah, S. B., & Shufletoski, A. (2014). Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations, 68(4), 309–317.
- Gallay, M. (2013). Direct acquisition of elevation data : Aribone Laser Scanning. *Geomorphological Techniques*, 1(January 2013), 1–14. Retrieved from [http://www.geomorphology.org.uk/geomorph\\_techniques](http://www.geomorphology.org.uk/geomorph_techniques)
- Gerke, M., & Przybilla, H.-J. (2016). Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2016(1), 17–30. <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>
- Gienko, G. A., & Terry, J. P. (2014). Three-dimensional modeling of coastal boulders using multi-view image measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.3485>

- Heritage, G. L., & Milan, D. J. (2009). Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.021>
- Hodgson, M. E., & Bresnahan, P. (2004). Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *70*(3), 331–339. <https://doi.org/10.14358/pers.70.3.331>
- Holst, J. M. F. G., Rotter, J. M., Calladine, C. R., Eoin Dunphy, NORM, E. S. N. E. Euro., DNV, ... Starnes, J. H. (2011a). Eurocode 8 Part 2: Design of structure for earthquake resistance: Bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, *54*(2), 18–20. <https://doi.org/10.2514/2.2772>
- Holst, J. M. F. G., Rotter, J. M., Calladine, C. R., Eoin Dunphy, NORM, E. S. N. E. Euro., DNV, ... Starnes, J. H. (2011b). Eurocode 8 Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, *54*(2), 18–20. <https://doi.org/10.2514/2.2772>
- Hugenholtz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B. J., LeClair, A., ... Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.023>
- Imhof, D. (2004). *Risk assessment of existing bridge structures*. University of Cambridge.
- Law, D. W., Holden, L., & Silcock, D. (2015). The assessment of crack development in concrete using a terrestrial laser scanner (TLS). *Australian Journal of Civil Engineering*, *13*(1), 22–31. <https://doi.org/10.1080/14488353.2015.1092635>
- Mader, D., Blaskow, R., Westfeld, P., & Maas, H. G. (2015). UAV-Based acquisition of 3D point cloud - A comparison of a low-cost laser scanner and SFM-tools. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *40*(3W3), 335–341. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-335-2015>
- Marcus, W., & Fonstad, M. (2008). Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents. *Earth Surf. Process. Landforms*, *33*(December 2007), 1491–1501. <https://doi.org/10.1002/esp>
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2018). Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni” - NTC 2018, 1–198.
- Ni, Y. Q., & Wong, K. Y. (2012). Integrating Bridge Structural Health Monitoring and Condition-Based Maintenance Management. *4th International Workshop on Civil Structural Health Monitoring*, 6–8.
- Pinto, P. E., Franchin, P., & Lupoi, A. (2009). Valutazione e consolidamento dei ponti esistenti in zona sismica, *7*.
- Power, M., Fishman, K. L., Makdisi, F., Musser, S., Richards, R., Youd, T. L., ... Youd, T. L. (2004). Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 2 - Retaining Structures, Slopes, Tunnels, Culverts and Roadways. *Mceer*, (August), 370p.
- Proske, D. (2009). *Safety of historical stone arch bridges*. Springer.
- Rioja, F. (2013). What Is the Value of Infrastructure Maintenance? A Survey. *Infrastructure and Land Policies*, 347–365. Retrieved from [https://www.lincolnst.edu/pubs/dl/2304\\_1644\\_LPCConf\\_2012\\_ch13\\_What Is the Value of Infrastructure Maintenance.pdf](https://www.lincolnst.edu/pubs/dl/2304_1644_LPCConf_2012_ch13_What%20Is%20the%20Value%20of%20Infrastructure%20Maintenance.pdf)
- Sithole, G., & Vosselman, G. (2006). Bridge detection in airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *61*(1), 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.07.004>
- Smith, M. W. (2015). Direct acquisition of elevation data: Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphological Techniques*, *1*, 1–14. Retrieved from [http://www.geomorphology.org.uk/geomorph\\_techniques](http://www.geomorphology.org.uk/geomorph_techniques)
- Taly, N. (1998). *Design of Modern Highway Bridges*. McGraw-Hill. Retrieved from <https://books.google.it/books?id=VABFAQAIAAJ>
- Tang, M. C. (2017). Super-long span bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, *13*(6), 722–730. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1187635>
- Truong-Hong, L., & Laefer, D. F. (2014). Application of Terrestrial Laser Scanner in Bridge Inspection: Review and an Opportunity. *IABSE Symposium Report*, *102*(9), 2713–2720.

<https://doi.org/10.2749/222137814814070190>

Unione Province Italiane. (2018). Nota stampa Ponti : i risultati del monitoraggio delle Province, 0–3.

WeiWei, L., & Teruhiko, Y. (2013). *Bridge Engineering* (Vol. 53). Elsevier.

<https://doi.org/10.1126/science.45.1151.66>

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>

|

## CAPITOLO II





## 2 Droni: Ausilio all'indagine visive e modellazione 3D

### 2.1 Ispezione e manutenzione delle opere d'arte stradali

I droni sono degli apparecchi volanti caratterizzati dall'assenza del pilota a bordo. Il loro volo è controllato dal computer a bordo del mezzo aereo oppure tramite il controllo remoto di un navigatore o pilota, sul terreno o in altre posizioni.

Il nome degli Unmanned Aerial Vehicles è cambiato nel corso degli anni: siluri aerei, veicoli senza pilota, aerei radiocomandati, aerei telecomandati, veicoli a pilotaggio remoto; l'aereo modello o "drone", può essere considerato una sottocategoria dell'aeromobile senza equipaggio.

Oggi i nomi comunemente diffusi sono *RPAS* (Remotely Piloted Aircraft System), utilizzato in tutto il mondo dalle agenzie aeronautiche, *UAS* (Unmanned Aerial System) e *UAV* (Unmanned Aerial Vehicle).

*UAV* (Unmanned Aerial Vehicle) è l'acronimo più diffuso teso a identificare tutte le classi di aerei, elicotteri e aerei a sollevamento motorizzati, senza pilota a bordo che volano per svolgere compiti specifici, e che possiedono un alto grado di "intelligenza automatica" in grado di comunicare con i loro controller e restituire i dati di missione.

*UAS* (Unmanned Aerial System) è l'acronimo per descrivere l'intera apparecchiatura operativa, incluso l'aeromobile o l'*UAV* stesso e i sensori, la stazione di controllo da cui l'aeromobile è operato e il collegamento dati wireless.

Le applicazioni di questi sistemi sono in continua evoluzione e spaziano su diversi settori come l'architettura e l'edilizia ingegneristica, il telerilevamento, il rilevamento e il monitoraggio, le riprese e la logistica.

L'unica limitazione per le applicazioni di questa tecnologia a livello industriale è rappresentata da vincoli legali/normativi effettivamente in fase di definizione in diversi paesi.



Figura. 1 - Primo aereo senza equipaggio della storia, prima guerra mondiale  
Fonte: Culla del museo dell'aviazione, galleria della prima guerra mondiale

### 2.2 Breve storia dei veicoli aerei senza equipaggio

L'origine e l'evoluzione di Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sono strettamente legate a ragioni militari e all'evoluzione tecnologica dei sistemi di comunicazione radio, elettronica e logistica della guida e del controllo.

I primi UAV militari furono schierati per consentire l'uso di siluri e armamenti a lungo raggio. L'idea principale alla base dell'uso dell'*UAV* nella storia dell'aviazione è interamente sintetizzata dal modello operativo

delle "tre D", come descritto oggi: *Dangerous*, *Dirty* and *Dull*. Dove *Dangerous* significa che la vita del pilota può essere a rischio operativo, *Dirty* significa che l'ambiente da ispezionare preclude l'esposizione umana in quanto contaminato da pericoli chimici, biologici o radiobiologici che e *Dull* significa che la missione richiede lunghe ore a bordo, rendendo il volo con equipaggio stressante e faticoso. Agli inizi, l'idea di pilotare un aereo senza persone a bordo aveva l'ovvio vantaggio di rimuovere il rischio, tuttavia, la mancanza di un metodo soddisfacente per controllare questi veicolo ha limitato l'uso dei primi aeromobili senza equipaggio.

Il primo aereo senza equipaggio il "Siluro Aereo" (*Figura 1*) fu realizzato dalla Marina nel 1916, ma i due sistemi di base che ne hanno consentito il controllo da remoto sono stati creati quasi vent'anni prima. La comunicazione radio, inventata da Nicola Tesla rese possibile la trasmissione del segnale all'aereo da remoto, e il giroscopio, inventato da Elmer Sperry, fu utilizzato per le misurazioni inerziali a bordo, permettendo la stabilizzazione del veicolo. Entrambi gli inventori lavorarono inizialmente a quei sistemi per siluri sottomarini e sistemi relativi alla guida.

La prima guerra mondiale stimolò il rapido sviluppo del settore dell'aviazione, che si combinava con l'invenzione della radio, l'aereo, e pilota automatico meccanico si unì al primo pratico aereo senza pilota al mondo. Il "Siluro Aereo" fu in grado di volare senza equipaggio verso un bersaglio specifico e far detonare la sua testata. Le caratteristiche dell'aeromobile possono essere elencate come a (i) girostabilizzatore per mantenere il livello dell'aeromobile (ii) un giroscopio sterzante automatico per mantenere l'aeromobile su una direzione prestabilita (iii) un barometro per indicare l'altitudine di crociera, garantendo il livellamento dell'aeromobile, e (iv) un contatore di rivoluzione del motore per determinare quando l'aeromobile avrebbe dovuto fermarsi per orientarsi sul suo obiettivo. Anche l'esercito degli Stati Uniti investì in un concetto di bomba aerea come il siluro aereo, ingaggiando Charles Kettering per progettare un biplano leggero in grado di trasportare un carico utile esplosivo. Il "Kettering Bug" (*figura 3*) del peso di 270 kg, era alimentato da motori Ford da 40 cavalli ed era in grado di trasportare 82 kg di carico utile.

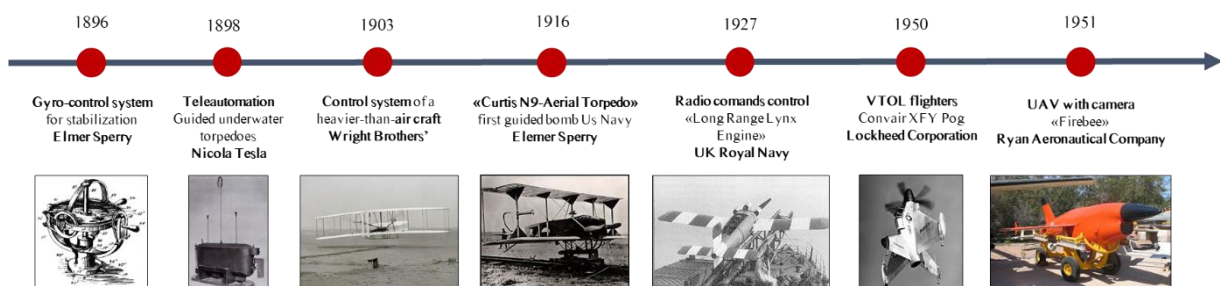


Figura 2 - Pietra miliare nell'evoluzione dell'UAV all'inizio del 1950



Figura 3 - "Bug kettering"  
 Fonte: Enciclopedia di Astrobiologia, Astronomia e Volo Spaziale

Questo sistema integrava caratteristiche di stabilità statica su di un telaio leggero in modo da ridurre i costi.

Kettering Bug rappresenta il primo aereo senza equipaggio prodotto in serie.

Nello stesso periodo, nel 1914 l'esercito britannico introdusse l' "Aerial Target", un monoplano senza pilota radiocomandato costruito per indirizzare, attraverso segnale radio, una bomba volante verso il suo bersaglio. Il livello di sviluppo raggiunto durante la costruzione di questi tre veicoli ha segnalato l'inizio di una nuova era tecnologica per l'aviazione.

Dopo la prima guerra mondiale (1919-1939) il lavoro di ricerca si concentrò principalmente sull'impiego di aerei senza equipaggio, e durante la seconda guerra mondiale, i sistemi senza equipaggio furono applicati sia come drone bersaglio sia come sistema per la consegna di armi. Tuttavia tali sistemi hanno avuto poco successo nel settore della ricognizione a causa per lo più dello scarso sviluppo delle tecnologie di imaging e delle esigenze di navigazione che per la piattaforma aerea stessa. Le telecamere negli anni '40 richiedevano infatti una navigazione relativamente accurata per ottenere le aree di interesse desiderate, e la tecnologia di navigazione automatica dell'epoca non poteva competere con un pilota addestrato con una mappa. Questo cambiò negli anni del dopoguerra con l'avvento della mappatura radar, che garantiva una migliore radio navigazione e navigazione inerziale, permettendo così agli aereomobili di volare autonomamente da e verso l'area bersaglio con sufficiente precisione.

Successivamente, durante il "Project Fox" della Marina degli Stati Uniti si è riusciti ad installare una telecamera RCA sull'aeromobile. Questo veicolo è stato considerato come la prima vera esperienza di remote control.

Nel 1951 gli UAV iniziarono ad essere utilizzati definitivamente per scopi di ricognizione su territori nemici, la "Firebee" trasportava infatti una macchina fotografica, le cui fotografie venivano sviluppate alla base dopo il ritorno dell'UAV.

Il 1959 è un'altra importante pietra miliare nell'evoluzione dell'UAV: il Drone Anti-Submarine Helicopter, "Gyrodyne DASH" è stato il primo sistema a introdurre l'uso di un rotorcraft UAV, con un design

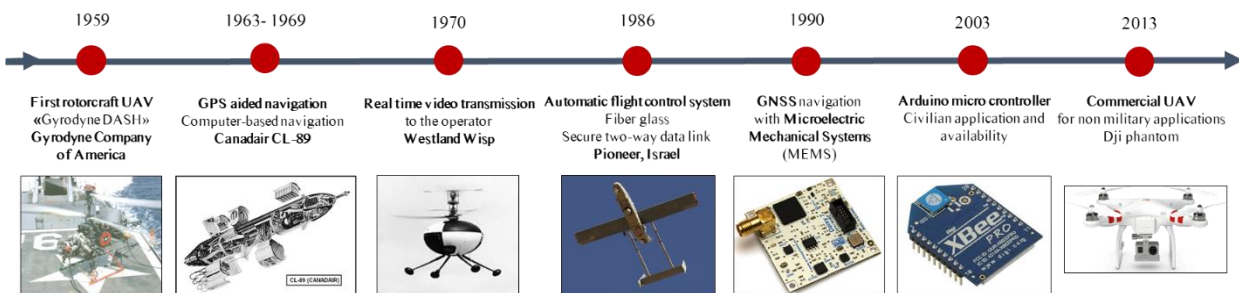


Figura 4 - Pietra miliare nell'evoluzione dell'UAV dal 1959 agli ultimi giorni

specifico, dedicato e concepito al trasporto di siluri per attaccare sottomarini nemici.

Durante la guerra fredda, a causa della crescente importanza delle missioni di sorveglianza, la ricerca primaria relativa allo sviluppo degli UAV divenne il miglioramento delle caratteristiche di durata e resistenza in volo. Infatti, la combinazione tra gli alleggerimenti delle tecnologie informatiche e la rete satellitare Global Positioning System ha permesso di ottenere un'autonomia di volo alla pari con il veicolo pilotato dall'uomo. In questo periodo appaiono i primi veicoli VTOL (Vertical Take-Off e Landing) in operazioni a corto raggio; e il sistema "Westland Wisp" è stato il primo rotorcraft VTOL con video in tempo reale.

Durante gli anni '80 con l'introduzione del "Canadair CL-89" il sistema di sorveglianza e navigazione UAV divenne ancora più avanzato, fornendo informazioni visive in tempo reale sul territorio nemico con un raggio operativo di 70 km e la guida del veicolo avveniva mediante un programma pre-impostato. Nel 1986 gli aerei "Pioneer", pilotati a distanza tramite joystick, divennero il sistema più frequentemente utilizzato. Il volo era completamente autonomo (Pioneer aveva un'autonomia di circa 150 km con un'altitudine di 2000 piedi), anche se il GPS e l'alimentazione del computer non erano ancora sufficientemente integrati per consentire agli operatori di terra di designare waypoint in tempo reale. Tra l'altro i collegamenti satellitari non erano ancora sviluppati in misura sufficiente per garantire la trasmissione dei dati. Per questo motivo, negli anni '90 la crescente disponibilità di computer a basso costo e sistemi GPS più precisi e miniaturizzati consentirono un controllo più preciso, liberando gli UAV dalle loro dipendenze da sistemi di navigazione integrati imprecisi.

Gli anni 2000 videro un uso molto maggiore dell'UAV in ruoli militari, con aerei in grado di trasportare armamenti mentre svolgevano missioni di ricognizione militare. Ma sebbene potenzialmente più estese di quelle militari, le operazioni civili non si sono concretizzate a causa della difficoltà percepita nel garantire la separazione tra sistemi con equipaggio e senza equipaggio. Nei primi anni 2000 (post attacco terroristico dell'11 settembre), gli aerei senza equipaggio hanno rallentato il loro progresso, non tanto per le barriere tecnologiche, ma perché le tecnologie degli aeromobili con equipaggio venivano considerate più affidabili in termini di sicurezza.

Successivamente, le argomentazioni contro gli aerei senza equipaggio aveva finalmente lasciato il posto ai costi bassi, al rischio ridotto e alla pratica di un drone nell'esecuzione delle missioni fastidiose, lunghe e pericolose.

La svolta nel 2003 è stata l'introduzione del microcontrollore a basso costo come Arduino, che consentì la disponibilità commerciale e l'aumento dei sistemi UAV per scopi civili e applicazioni in diversi settori. Oggi, da un ampio punto di vista, si può sostenere che i rapidi



Figura 5 - UAV commerciale DJI Phantom

progressi negli aerei hobbisti radiocomandati e lo sviluppo di sistemi di stabilità e navigazione automatizzati in miniatura stanno creando una rivoluzione commerciale di questa tecnologia che è rivaleggiata solo dai computer e dai telefoni cellulari. Questa rivoluzione è avvenuta così rapidamente che gli organismi di regolamentazione hanno avuto difficoltà a controllarne la proliferazione in molte industrie commerciali.

Oggi il mercato è dominato dall'azienda cinese *Da-Jiāng (Gran Generale) Innovazioni*, meglio conosciuta come *Dji*, fondata nel Shenzhen nel 2006 che fabbrica un'ampia gamma di prodotti tra cui veicoli aerei senza equipaggio, piattaforme volanti, controller di volo per multirotori, accessori per elicotteri, gimbal aerei e portatili e stazioni di terra. Il modello Phantom (Figura 5), rilasciato nel gennaio 2013, è il prodotto più popolare e comunemente associato al drone stesso.

I prossimi passi nell'evoluzione di UAV e della loro applicazione saranno sicuramente l'automazione dei processi (Sebbane, 2016; 2016 - Gonzalez et al.) e l'applicazione di algoritmi di intelligenza artificiale per l'autonomia di volo (H. Chen, Wang, & Li, 2009; Ma'sum et al., 2013; Lu et al., 2018).

### 2.3 Definizione e descrizione degli UAS

L'aeromobile è solo una parte dello UAS (Unmanned Aerial System), di un sistema più complesso e completo. In effetti, gli UAS si articolano in tre elementi essenziali (Figura 6):

- Aeromobili senza equipaggio*, che trasportano i sensori in base alle esigenze dei compiti operativi;
- Stazione di controllo (CS)* che ospita sia gli operatori di sistema, sia le interfacce tra gli operatori e il resto dei sistemi;
- Datalink o comunicazione di sistema*, solitamente ottenuta tramite trasmissione radio, che consente la comunicazione tra aeromobile (e sensore) e stazione di controllo.

Questo sistema, che deve essere considerato parte dell'ambiente del trasporto aereo con norme e regolazioni, comprende diversi sottosistemi che includono i trasporti, la comunicazione, il lancio e il recupero degli aeromobili e l'equipaggio aereo. L'aereo è progettato per essere utilizzato senza un equipaggio a bordo, che viene sostituito da un sottosistema elettronico di intelligence e controllo. Informazioni dettagliate sul sistema UAS sono disponibili in (Fahlstrom & Gleason, 2012; Douglas M. Marshall Richard Kurt Barnhart, 2016).

#### Aerei senza equipaggio

L'aeromobile è la parte del sistema utilizzato per trasportare sensori (riconosciuto come sottosistema indipendente) ed è composto dalle seguenti parti principali (Figura 7):

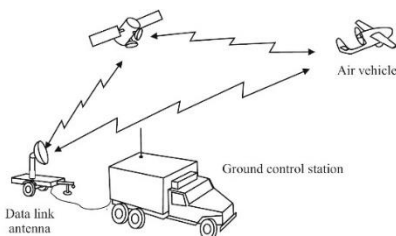


Figura 6 - Elemento UAS di Base

- a. **Unità di propulsione:** i rotori di un quadricottero che ruotano nella direzione opposta.
- b. **Scocca:** il nome proprio del telaio UAV.
- c. **Motori:** motori CC o CA che danno energia ai rotori.
- d. **Controller di velocità elettronici:** gli ESC convertono DC in AC per il motore brushless e regolano anche l'alimentazione del motore.
- e. **Sensori:** è anche a bordo del veicolo aereo, ma è riconosciuto come un sottosistema indipendente che spesso è facilmente intercambiabile con diversi veicoli aerei e progettato in modo univoco per realizzare una o più di una varietà di missione.
- f. **Montanti di atterraggio:** gli appoggi su cui posa il drone quando è a terra
- g. **Sistema di alimentazione elettrica:** spesso una batteria LiPo che garantisce energia ad alta tensione alle eliche e alle elettroniche di bordo.
- h. **Ricevitore:** che trasmette le informazioni al controllore di volo.
- i. **Controllore di volo:** assiste il volo manuale con funzione autonoma garantire la stabilità dell'UAV.

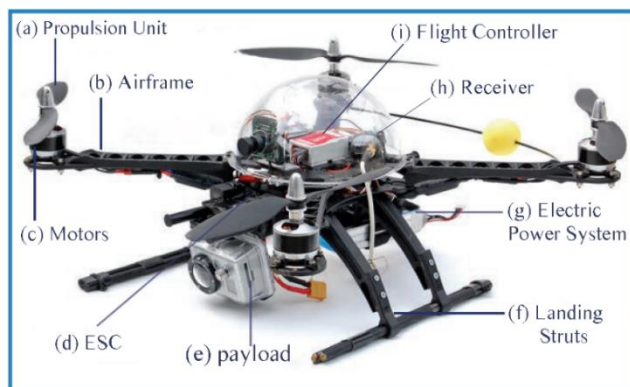


Figura 7 - Componenti principali Uavmodello dirotore quad

### Stazione di controllo

La stazione di controllo (CS) fornisce le strutture per il controllo umano dei veicoli senza equipaggio nello spazio aereo. La CS può variare fisicamente da un telecomando di piccole dimensioni (RC) (Figura 8) a una struttura di grandi dimensioni e autonoma con più workstation (Figura 9).



Figura 8 - Telecomando UAV



Figura 9 - Stazione di controllo multipla militare

Gli UAS militari più grandi richiedono una stazione di controllo a terra con più personale per operare su sistemi aerei separati: almeno una stazione pilota, con il pilota in comando che gestisce l'aeromobile e il suo sistema e una stazione di sensori per il funzionamento del sensore e delle comunicazioni radio. Per uav più piccoli e meno sofisticati queste workstation possono essere combinate richiedendo un solo operatore.

Uno degli obiettivi principali nella future ricerche sugli UAS sarà la capacità per un equipaggio di operare più aeromobili da un GCS.

In base alla distanza tra l'UAV e il pilota remoto (che opera dalla stazione di controllo) l'operazione di volo può essere classificata come (Figura 10):

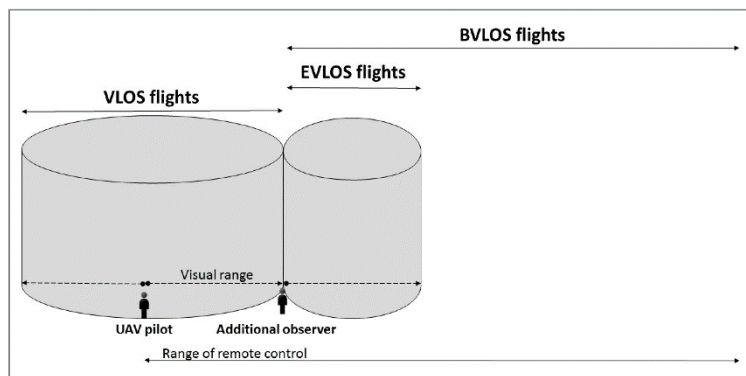


Figura 10 Distanza di funzionamento del volo

- **Operazione Visual Line Of Sight (VLOS):** l'operatore è sempre in grado di vedere l'UAV senza ausili visivi e rimane in contatto visivo durante l'intero volo.
- **Operazione Extended Visual Line-of-Sight (EVLOS):** l'operatore che comanda l'UAV può fare affidamento sugli altri osservatori remoti che si trovano in una visual line-of-sight dell'UAV. Gli osservatori remoti devono poter contare in tempo reale su informazioni critiche sul volo per l'operatore.
- **Operazione Beyond Visual line of Sight (BVLOS):** l'UAV è gestito da remoto tramite interconnessione tra UAV e una stazione di controllo a terra remota. I sistemi basati solo su telecamere

solitamente non sono sufficienti per consentire le operazioni BVLOS, è necessario installare ulteriori livelli di autonomia e sicurezza come i sensori di rilevamento e i sistemi di aggirare gli ostacoli.

- **Operazioni First Person View (FPV):** l'operatore utilizza videocamere di bordo per fornire una visione in tempo reale dall'UAV e la gestisce in base a questo flusso video (Figura 11).

### Datalink

Il collegamento dati (Figura 12) è un sottosistema cruciale per qualsiasi UAV perché fornisce una comunicazione a doppio senso, su richiesta o in modo continuo. Da un lato gli uplink di pochi kHz garantiscono il controllo della linea di volo del veicolo aereo e i comandi del suo sensore. Dall'altro lato, i downlink forniscono sia un canale a bassa velocità dati per riconoscere i comandi e trasmettere informazioni sullo stato del veicolo aereo, sia un canale ad alta velocità dati (1-10 MHz) per i dati dei sensori come video e radar. Ci sono anche collegamenti dati separati per alcuni sistemi di sensori. Le antenne per la trasmissione dei dati e la ricezione di comandi da terra si trovano nel terminale dati aereo: grazie a questo sistema di comunicazione il terminale di terra trasmette comandi di guida e al sensore e riceve informazioni sullo stato di volo e missione (come telemetria, stato della batteria) e dati dal sensore (gamma target, streaming video in tempo reale etc). Il datalink richiede anche una capacità anti-jam e anti-decrittazione per garantire il controllo completo dei sistemi ed evitare l'attacco esterno.

### 2.3.1 Sensori

Il sensore è un componente essenziale dell'UAV perché consente diverse attività e operazioni. La selezione del sensore corretto per l'applicazione è la prima decisione significativa della piattaforma che deve verificarsi e questa decisione deve essere basata sulle attività da eseguire o sulle informazioni desiderate da raccogliere; in effetti, le dimensioni e il peso del sensore sono due delle considerazioni più significative durante la progettazione di un UAS. Ogni tipo ha diversi vantaggi e svantaggi che devono essere attentamente pesati prima della inizio della missione. Il sensore può essere finalizzato a diversi scopi come sorveglianza, consegna, armi, comunicazione, rilevamento aereo, piattaforma per la comunicazione per estendere la copertura ecc. Generalmente, gli UAV sono progettati intorno al sensore previsto che impiegheranno.

In questa sezione vengono presentati i **sensori** utilizzati per la mappatura aerea. Il tipo di sensori può essere diviso in attivo e passivo in base alla fonte di illuminazione della luce:

- 1) I **sensori attivi** hanno la loro fonte di luce di illuminazione, inviano attivamente un'onda e misurano che il backscatter l'ha riflessa;



Figura 11 - Funzionamento FPV  
Fonte: Epson Moverio



Figura 12 - Collegamento dati esterno e terminale dati aerei



- **Time of Flight (ToF) Camera**

La termocamera a tempo di volo è una fotocamera 3D con un sensore di profondità che emette un impulso di luce infrarossa molto breve e ogni pixel del sensore della fotocamera misura il tempo di ritorno. Lo è tecnologia di imaging 3D altamente accurata in grado di misurare le distanze all'interno di una scena completa in un unico colpo e può essere utilizzato per la mappatura, la scansione degli oggetti, la distanza di misura, la navigazione interna, l'eliminazione degli ostacoli, il riconoscimento dei gesti, il tracciamento della fotografia 3D dell'oggetto e molto altro. Nonostante questo tipo di sensore sia efficiente, semplice, veloce e fornisca informazioni di profondità accurate a velocità di fotogrammi elevate in una fotocamera a stato solido a basso costo, non è ancora comunemente diffuso su UAV. La terza dimensione aggiuntiva e l'elaborazione



Figura 13 - Fotocamera Intel tempo di volo su UAV

delle immagini possono aprire tecniche di nuova via nell'ispezione industriale, nell'automazione e nella logistica, nonché Uomo-Computer Interazione.

- **Sensori laser (Lidar)**

Il rilevamento della luce e il raggio di gamma (Lidar) utilizzano un raggio laser e un ricevitore per misurare i ritardi nel riflesso del segnale dall'oggetto al rivelatore (Zhou, Yang, Li, & Yang, 2012). L'uso di Lidar su UAV richiede l'installazione di diversi accessori aggiuntivi per bilanciare il movimento aerodinamico e compensare lo spostamento indotto come Inertial Measurement Unit (IMU), antenna GPS e computer. Per questo motivo l'uso di questi sensori sull'UAV è ancora impegnativo in termini di dimensioni e peso (Colomina & Molina, 2014), ma la crescente popolarità degli UAV a basso costo ha incoraggiato lo sviluppo di Lidar miniaturizzato, grazie alla precisione del livello rispetto all'altitudine di volo nelle indagini (W. Zhang et al., 2016).

2) **Passivo:** misurare la luce solare riflessa, spettro elettromagnetico (Figura 14), emesso dal sole.

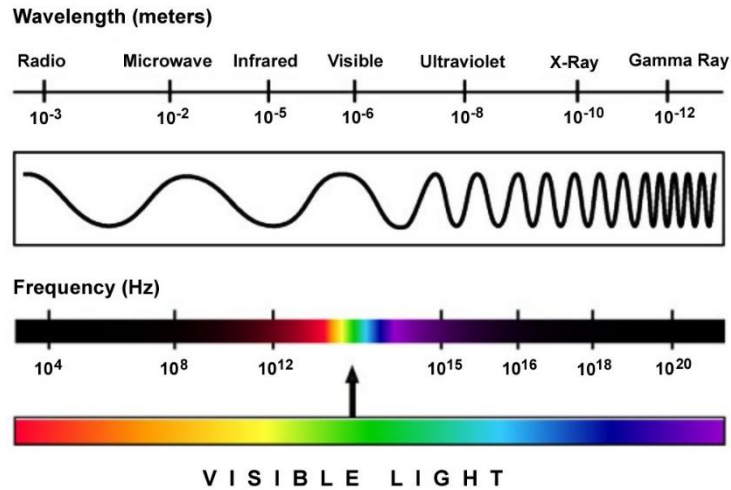


Figura 14 - Spettro elettromagnetico

- **Spettro della luce visibile (VLS) Electro-Ottico Fotocamera**

Le telecamere t operano nello spettro della luce visibile (Figura 15) e sono chiamate elettro-ottiche perché usano l'elettronica per ruotare, ingrandire, mettere a fuoco e catturare immagini. Le immagini che producono possono essere sotto forma di video full-motion, immagini fisse o persino immagini fisse e video mescolate. La qualità dell'immagine e del video è strettamente correlata alla qualità del sensore. L'aumento delle dimensioni del sensore corrisponde a un aumento di peso e conseguentemente più energia per eseguire il carico utile. La scelta giusta di un sensore dipende dalle esigenze di missione ed è fondamentale per il risultato finale dell'operazione. Il tipo di questo sensore viene generalmente utilizzato per l'acquisizione di video/ immagini o la ricostruzione fotogrammettrica.

- **Infrarossi termici**

I sensori termici a infrarossi operano nella gamma infrarossa (IR) dello spettro elettromagnetico (700nm – 1mm) chiamato IR o FLIR (Forward-looking InfraRed). Due tipi di fotocamera vengono utilizzati su UAV come sensore: raffreddato e non raffreddato. Le telecamere raffreddate (moderne sono raffreddate da criocooler a una temperatura criogenica inferiore a 150 °C) sono spesso più costose e pesanti delle telecamere non raffreddate, ma producono un'immagine di qualità superiore nella banda infrarossa a onde medie (MWIR) e longwave infrared (LWIR). In questo spettro di bande, il contrasto termico è elevato.

Le telecamere non raffreddate utilizzano sensori che si trovano a temperatura ambiente o appena al di sotto di essa e funzionano



Figura 15 - Sensore UAV fotografico  
Fonte: DJI

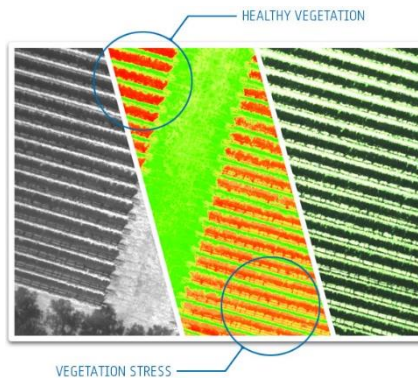


Figura 16 - Analisi della vegetazione multispettrale

attraverso il cambiamento di resistenza, tensione o corrente creato quando riscaldato dalla radiazione infrarossa che rileva.

• **Spettrale: Vicino Infrarosso (NIR), Sensori infrarossi (IR), Multispettrali e iperspettrali**

Questa classe di sensori è particolarmente utile relativamente alle ispezioni sulla crescita delle piante. I sensori multispettrali (Figura 17) e di imaging iperspettrale possono rilevare la lunghezza d'onda dell'energia esistente al di fuori della luce visibile tipografica. Questa energia spesso ricercata per l'analisi è la banda RGB (Red Green Blue) o la banda infrarossa. Gli scienziati coinvolti nel campo agricolo spesso studiano la quantità di energia riflessa o assorbita dalla vegetazione e queste informazioni vengono quindi analizzate per determinare la salute o lo stato delle piante (Albetis et al., 2018; Berni et al., 2009; Candiago et al., 2015).



Figura 17 - Fotocamera e sensori multispettrali  
Fonte: Sequoia pappagallo

Le Normalizzato Differenza Vegetazione Indice (NDVI) È Comunemente Utilizzato Per Questo Applicazione (Stark, 2000, 2003 - Pinter et al.):

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (1)$$

Il secondo più comunemente usato nell'analisi fitosanitaria è il Green Normalized Vegetation Index (GNVI) (Taylor, Vygodskaya, Gorshkova, & Fadeyeva, 1989):

$$NDVI = (NIR - Green)/(NIR + Green) \quad (2)$$

L'interpretazione biofisica dell'NDVI è la frazione della radiazione fotosinteticamente attiva assorbita. Questi indici possono essere utilizzati per informare le mappe delle prescrizioni (Figura 16) per le colture di concimazione e semina, nonché le stime della resa delle colture in modo che gli agricoltori possano massimizzare il profitto (Prasad et al., 2006).

### 2.3.2 Metodi di controllo

Le missioni potrebbero essere condotti in modi diversi, a seconda del tipo di controllo degli aeromobili. Il funzionamento dell'aeromobile spazia dal controllo manuale completo, stabilizzato o "telecomando", ai profili di volo automatizzati senza controllo diretto della linea di volo. Il livello di automazione nella missione di volo dipende da diversi fattori, tra cui, il numero di movimenti ripetitivi degli aeromobili richiesti, la vicinanza degli aerei ad altri oggetti e la natura dinamica della missione. I metodi di controllo possono essere suddivisi in controllo manuale, controllo stabilizzato, controllo pianificato e controllo autonomo.

#### Controllo manuale

In manuale Controllo, l'operatore ha il controllo diretto e non assistito della configurazione dell'aeromobile e della via di volo. Questo metodo di comando, tipicamente applicato attraverso una console, consente all'operatore di apportare modifiche sottili nel rollio del passo dell'aeromobile, Imbardata e acceleratore per eseguire tutti i tipi di

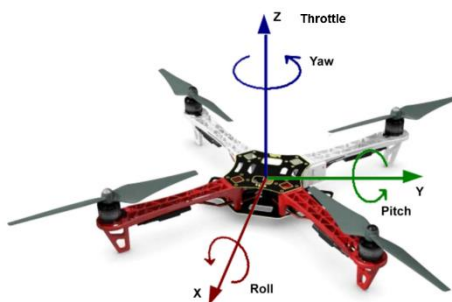


Figura 18 Angoli di rotazione degli aeromobili

manovre (Figura 18).

La console può essere configurata per fornire un controllo esponenziale a seconda del grado di ingresso applicato, per ridurre o amplificare input e comandi e l'operatore può anche fornire il controllo diretto sui sottosistemi degli aeromobili come carrello di atterraggio etc. Questo metodo richiede un operatore esperto, con un lungo addestramento, esperienza e un controllo preciso della linea di volo dell'aeromobile; in questa configurazione, infatti, l'UAV è sensibile ad agenti esterni (come il vento) che possono ridurre la stabilità durante il volo.

#### Controllo stabilizzato

In questa modalità l'operatore ha il controllo diretto e assistito della linea di volo dell'aeromobile. Questo tipo di controllo dell'aeromobile in genere invia gli input dell'operatore da una console portatile ad un pilota automatico a bordo dell'aeromobile che traduce gli input diretti in

output desiderati. Il controllo stabilizzato garantisce una guida sicura dell'aeromobile, consentendo all'operatore di mantenere il controllo diretto della posizione dell'aeromobile e compensando le forze esterne, riducendo la necessità di un controllo manuale. Il controllo stabilizzato riduce drasticamente il livello di abilità dell'operatore necessario per controllare in modo efficace e sicuro l'aeromobile, pur fornendo un controllo dinamico della via di volo. La maggior parte dei sistemi VTOL, utilizzati per applicazioni che richiedono un posizionamento ripetitivo e preciso dell'aeromobile su un'area di interesse, come la grande mappatura aerea, sono in grado di stabilizzare il controllo dell'aeromobile; ciò ha portato a una significativa crescita del mercato VTOL a causa della facilità di funzionamento dell'aeromobile.

Il sistema di comando per il controllo stabilizzato comprende:

**Radiocontrollo (RC)** da parte di un pilota esterno (EP) che utilizza una vista remota in terza persona dell'UAV (molto comune per i piccoli UAV)

**Console di volo** (Figura 19), simile a una cabina di pilotaggio, utilizzando una vista fissa in avanti per consentire a un pilota esterno di pilotare l'UAV come in un simulatore.

**Realtà virtuale (VR)** metodi che impiegano le varie forme di volo FPV (First Person View).



Figura 19 - Stazione di controllo per veicoli senza equipaggio  
Fonte: Polpo Sistemi ISR

### Controllo pianificato

Con il controllo pianificato, l'operatore ha un controllo indiretto e assistito della linea di volo dell'aeromobile. Questo tipo di controllo viene in genere condotto attraverso un'interfaccia software grafica che fornisce una visualizzazione posizione dell'aeromobile sovrapposta alle immagini aeree o satellitari. L'operatore può solitamente pianificare la missione strumenti di pianificazione del software (Figura 20) e anche caricare comandi sull'aeromobile durante la missione per modificare la linea di volo. L'autopilota dell'aeromobile determina la superficie di controllo e gli input dell'acceleratore per posizionare l'aeromobile sulla linea di volo desiderata in uno spazio 3D e l'operatore osserva il



Figura 20 - Interfaccia di pianificazione della missione per la progettazione del volo di missione

comportamento dell'aeromobile per garantire che la missione sia condotta come previsto. Il controllo pianificato richiede una minima abilità diretta dell'operatore per il controllo degli aeromobili, ma una profonda comprensione dei sistemi e delle competenze con il software di missione; tuttavia, la moltitudine di interfacce software per gli UAS varia significativamente in complessità. Le interfacce possono variare in base alle funzionalità necessarie. Le missioni pianificate vengono solitamente eseguite per compiti ripetitivi e precisi. Il controllo pianificato con pilota automatico di solito utilizza un sistema satellitare di rete globale (GNSS) waypoint per definire un piano di volo, decollo e atterraggio automatici (ATOL).

### Controllo automatizzato

Nel contesto automatizzato sono stati individuati tre livelli principali di autonomia:

- Lato reattivo: sistema di controllo del volo o controllo della propulsione; meccanica del volo aereo e acquisizione dei dati aerei.
- Lato riflettente: comando del percorso di volo e protezione dell'involuppo delle prestazioni, controllo a tolleranza d'errore
- Lato decisionale: rilevamento e identificazione dei guasti.

Questo quadro teorico prende in prestito da varie discipline come l'aeronautica, il controllo automatico, la robotica, l'informatica e l'ingegneria, l'intelligenza artificiale, la ricerca operativa. Nel controllo automatizzato, l'UAV è indipendente dall'operatore e può volare autonomamente, prendere decisioni in base al contesto, evitare ostacoli e portare a termine la missione in base alle esigenze.

## 2.4 Classificazione UAS

La classificazione UAS può variare in base a criteri diversi. Il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti categorizza l'UAS in cinque diversi gruppi in base al loro peso, da sUAS (piccolo sistema di aeromobili senza equipaggio) a UAS più grande. In futuro, la FAA (US Federal Aviation Authority) dividerà anche gli UAS in base a una classificazione basata sul rischio a seconda del loro potenziale impatto sulla sicurezza pubblica. (Chen et al., 2016)

Categoria	Dimensione	Peso massimo lordo al decollo	Altitudine operativa media (m)	Velocità dell'aria (km/h)
Gruppo 1	Piccolo	0-20	< 360 AGL	< 185 km/h
Gruppo 2	Medio	21-55	< 1066 AGL	< 463 km/h
Gruppo 3 (Unione europea)	Grande	<1320	< 5486 AGL	< 463 km/h

Gruppo 4	Maggiore	<1320	< 5486 AGL	Qualsiasi velocità dell'aria
Gruppo 5	Maggiori	<1320	< 5486 AGL	Qualsiasi velocità dell'aria

Tabella 1 - Classificazione UAS secondo il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti

La classificazione UAV ha generalmente seguito una descrizione militare esistente della piattaforma, in base a caratteristiche come dimensioni, resistenza al volo e capacità (Watts, Ambrosia e Hinkley, 2012):



Figura 21 - UAV Anuncio ala fissa



Figura 22 - UAV a sei rotori VTOL

- **High Altitude Long Endurance (HALE):** sistemi in grado di volare oltre 1500 m di altitudine e con più di 24 ore di resistenza. Progettati per eseguire missioni di ricognizione e sorveglianza a lungo raggio
- **Resistenza lunga a media altitudine (MASCHIO):** volare tra i 5000 e i 15000 m di altitudine, con un massimo di 24 ore di resistenza.
- **Medio Raggio o UAV tattico (TUAV):** per missione composta da voli tra 100 e 300 km. Veicoli più piccoli e operati all'interno di un sistema più semplice rispetto all'HALE-MALE
- **UAV a distanza ravvicinata:** portata operativa di 100 km, probabilmente il tipo più prolifico di UAV, inclusi ruoli diversi come ricognizione, designazione del bersaglio, sicurezza dell'aeroporto, ispezione delle linee elettriche, irrorazione delle colture e monitoraggio del traffico
- **Mini UAV (MUAV):** UAV il cui peso è minore di 20 kg, con range operativo fino a circa 30 km
- **Micro UAV (MAV):** UAV con apertura alare non superiore a 150 mm. Questo tipo di UAV è molto vulnerabile alle turbolenze atmosferiche
- **Nano-Veicoli aerei (NAV):** delle dimensioni di 10 mm, utilizzati in sciami per scopi come la confusione radar. Vengono inoltre proposti per la sorveglianza a corto raggio.
- **Elicottero a pilotaggio remoto (RPH):** veicolo aereo in grado di eseguire il decollo e l'atterraggio verticali (VTOL). Sono comunemente usati nelle missioni che richiedono un volo in bilico.
- **Alafissa :** Figura 21) nel campo civile è più utilizzata per missioni a lunga distanza, a lungoraggio e ad alta quota, specialmente nel monitoraggio ambientale.
- **Flapping-Wings:** le ali sbattenti cercano di riprodurre il modo in cui volano uccelli o insetti. La maggior parte di essi è ancora in fase di sviluppo.
- **Dirigibili:** i dirigibili o gli UAV "più leggeri dell'aria" assicurano il sollevamento utilizzando i loro serbatoi pieni di elio, e sono capaci di effettuare missioni di lunga resistenza. Dal momento che

non è necessaria energia per sollevare l'UAV, questo risparmio può essere utilizzato come sorgente per attuatori di spostamento.

- **Ali rotanti:** l'esempio tipico degli UAV a ali rotanti sono gli elicotteri: un aereo a due rotori, con il rotore principale che dà la spinta e un rotore di coda anti-coppia. La configurazione più notevole sono VTOL convertibile, quadrotor, sei rotori (FiguraFigura 22rotori. Il design con più rotori consente la semplificazione della generazione di forze e della creazione di coppia, come accennato in precedenza. Il design a quattro rotori elimina le coppie giroscopiche create dai motori rotanti. Questa interessante configurazione consente ad ogni rotore di avere un diametro inferiore rispetto all'equivalente rotore ordinario dell'elicottero, consentendo loro di immagazzinare meno energia cinetica durante il volo. Per UAV su piccola scala, questo rende il veicolo più sicuro da interagire nelle vicinanze.

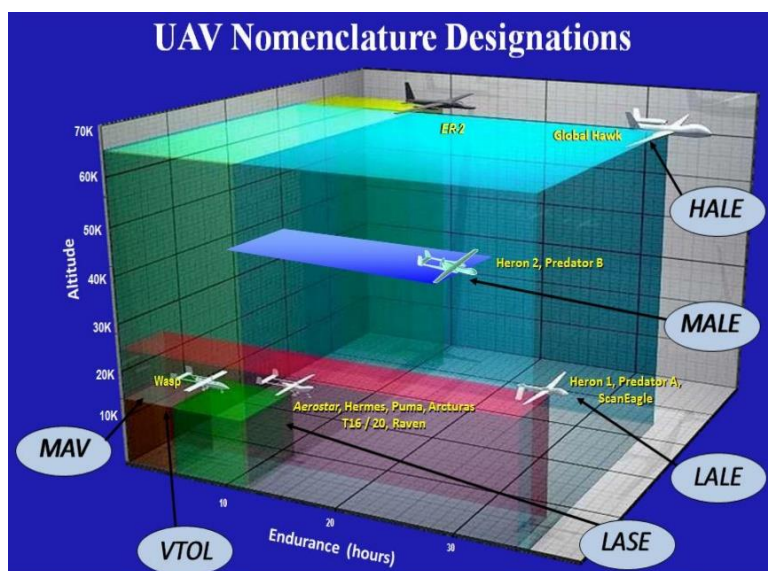


Figura 23 - Classificazione UAV per dimensione, Fonte: Watt 2012

## 2.5 Regolamento UAV

L'introduzione dei RPAS in campo civile e la loro disponibilità commerciale hanno comprensibilmente destato preoccupazione non solo tra la comunità aeronautica, ma anche nell'opinione pubblica, per quanto riguarda la probabilità che l'aeromobile vada fuori controllo e causi lesioni a persone o cose. Le autorità di regolamentazione hanno istituito leggi e regolamentazioni, tuttavia negli ultimi cinque anni è stato difficile per gli organismi di regolamentazione mantenere la rapida evoluzione tecnologica (Stöcker, et al. 2017) . Il regolamento è suddiviso in due attività, militare e civile.



I principali organismi di regolamentazione nell'amministrazione dello spazio di volo sono sintetizzati nella tabella Tabella 2

Organismo di regolazione	Zona
ICAO (Agenzia delle Nazioni Unite)	Mondiale
FAA (Federal Aviation Administration)	Usa
EASA (Agenzia europea per lo spazio e l'aviazione)	Europa
ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile)	Italia
CAA (Autorità per l'aviazione civile)	Regno unito
CAAC (Civil Aviation Administration of China)	Cina

Tabella 2 - Principali organismi di regolamentazione nel mondo dell'aviazione

Tutti gli aerei senza equipaggio, pilotati a distanza o completamente autonomi, sono soggetti alle disposizioni dell'articolo 8 della *Convenzione sull'aviazione civile internazionale* (1944) modificata dall'assemblea dell'Organizzazione internazionale dell'aviazione civile (ICAO). Gli UAS sono diversi dagli aeromobili con equipaggio, e questa differenza e la rapida disponibilità commerciale ne fanno la loro introduzione nella canalizzazione dello spazio aereo per gli organismi di regolamentazione e la comunità aeronautica. Senza alcuna persona a bordo dell'aeromobile, l'obiettivo dell'aeronavigabilità è principalmente quello di mirare alla protezione delle persone e delle proprietà sul terreno.

La comunità aeronautica si impegna a lavorare insieme sulla base del seguente principio dell'AESA (Agenzia europea per l'aviazione e lo spazio):

- L'UAV deve essere trattato come nuovi tipi di aeromobili con norme proporzionate basate sul rischio di ciascuna operazione;
- Le tecnologie e le norme devono essere sviluppate per la piena integrazione dell'UAV nello spazio aereonazionale;
- L'accettazione da parte del pubblico è fondamentale per la crescita dei servizi UAV;
- L'operatore di un UAV è responsabile del suo utilizzo.

L'ICAO ha preso in considerazione l'allegato e relativo all'uso degli UAS quando dirige l'integrazione degli UAS nello spazio aereo non segregato: licenze, regole dell'aria, funzionamento e aeronavigabilità degli aeromobili, comunicazione aeronautica, salvaguardia della sicurezza dell'aviazione civile internazionale da atti di interferenze illegali e spettro di radiofrequenze (Gimenes et al., 2014).

Nel 2016, FAA ed EASA hanno rilasciato l'approvazione per il volo di piccoli UAV commerciali, stabilendo l'obbligo di un certificato per consentire l'uso per lavori commerciali. La legislazione di molti paesi sottolinea la responsabilità del pilota e la necessità di essere formati e autorizzati; infatti, l'effettiva regolamentazione definisce che tutta la

responsabilità per eventuali danni a cose o lesioni appartiene all'operatore aereo.

Il regolamento per il lavoro commerciale e la delimitazione dello spazio aereo è definito seguendo linee guida comuni. Tuttavia, la parte critica dell'evoluzione della regolamentazione sarà la misura in cui uav può essere *gestito oltre la visual line-of-sight* (BVLOS) in aree popolate e / o senza un pilota dedicato per ogni UAV (consentendo a un singolo pilota di operare o monitorare più di un UAV contemporaneamente).

### 2.5.1 Europa - AESA

In Europa, il primo quadro sulla regolamentazione UAV è stato proposto nel 2016 dall'Unione europea come base comune per armonizzare la regolamentazione tra i diversi paesi e consentire una maggiore applicazione; la versione finale è in realtà in fase di sviluppo (Figura 24) e sarà efficace nel 2022. La commissione dell'AESA ha proposto un quadro incentrato sull'operazione, proporzionato, basato sul rischio e sulle prestazioni per tutti i tipi di aeromobili senza equipaggio, che garantirà l'uso sicuro dell'UAV nello spazio aereo civile e creerà certezza giuridica per l'intero settore e le parti interessate.



Figura 25 - Logo UAV Easa

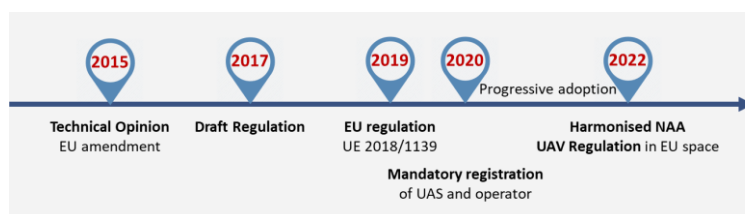


Figura 24 - Cronologia dell'approvazione del regolamento quadro sui droni, Fonte: EASA

Gli **aspetti principali** della proposta di regolamento possono essere riassunti come:

- Offre un framework per far funzionare in sicurezza i droni, consentendo al contempo a questo settore di rimanere agile, di innovare e continuare a crescere. Viene preso in considerazione anche il rischio posto alle persone a terra e ad altri aeromobili, nonché i problemi di privacy, sicurezza e protezione dei dati creati.
- Definisce i requisiti tecnici e operativi per i droni. I requisiti tecnici si riferiscono all'identificazione remota dei droni. I requisiti operativi si riferiscono, tra gli altri, alla geo-consapevolezza, un sistema che informa il pilota remoto quando un drone entra in una zona vietata. La proposta riguarda anche le qualifiche dei piloti. Inoltre, gli operatori di droni dovranno registrarsi, tranne quando utilizzano droni più leggeri di 250g.
- Rompe nuovi motivi combinando la legislazione sui prodotti e la legislazione sull'aviazione. In effetti, i requisiti di progettazione per

i piccoli droni saranno implementati utilizzando la legislazione relativa alla zione dei prodotti sul mercato (il noto marchio CE). Il marchio CE standard sarà accompagnato dall'identificazione della classe del drone (da C0 a C4) e da informazioni sui consumatori di cose da fare e da non fare che si trovano in tutte le scatole dei droni. In base alla classedrone, un operatore saprà in quale area può operare e quale competenza è richiesta.

- Consente un elevato grado di flessibilità per gli Stati membri dell'AESA; saranno in grado di definire zone nel loro territorio in cui le operazioni dei droni sono vietate o limitate (ad esempio per proteggere le aree sensibili) o in cui vengono alleviati requisiti specifici.

Considerando la gamma di operazioni del consiglio di amministrazione e i tipi di UAV, sono state proposte due categorie di operazioni e i relativi requisiti di sicurezza proporzionati al rischio (introduzione di un quadro normativo per il funzionamento dell'UAV, EASA, 2015)

- **La categoria aperta** di UAV non dovrebbe richiedere l'autorizzazione da parte di un'autorità aeronautica per il volo, ma rimane entro limiti definiti per l'operazione. In questa categoria, UAV deve essere utilizzato sotto la diretta Visual Line *Of Sight* (VLOS): 500 m, ad un'altitudine, non superiore a 150 m dal suolo o dall'acqua e al di fuori di aree riservate specificate (aeroporto, ambiente, sicurezza). Il peso dell'UAV dovrebbe essere inferiore a 25 kg.
- **Una categoria specifica** richiederà una valutazione del rischio che condurrà all'autorizzazione di un'operazione con limitazioni specifiche adottate per l'operazione. La categoria specifica dovrebbe riguardare le operazioni che non soddisfano le caratteristiche della categoria aperta in cui un rischio specifico deve essere mitigato da ulteriori limitazioni operative o da una maggiore capacità delle attrezzature e del personale associati.

In base alle esigenze del mercato, è stata data priorità allo sviluppo di un regolamento per le operazioni nella categoria "aperta" e "specifica". Le sottocategorie dell'"Open" sono suddivise in base al tipo di operazione (da A1 a A3) e alla classe UAS (da C0 a C4) riassunte nella Tabella3 (pareren.1 Introduzione di un quadro normativo per il funzionamento degli UAS nella categoria "Aperto" e "Specifico" EASA, 2018). Per supportare la gestione di un gran numero di operazioni RPAS, sono state sviluppate e inserite diverse classi di traffico nel regolamento europeo:

- Classe I: riservata alla RPAS EASA categoria A (solo VLOS)
- Classe II: Percorso gratuito (VLOS e BVLOS)
- Classe III: Traffico commerciale organizzato a medio/lungo raggio (solo BVLOS)
- Classe IV: Operazioni speciali (VLOS e BVLOS)

Tabella3 - Sottocategorie "Aperte"

Operazione	Competenza pilota remota	Uas			Registrazione operatore UAS
		Classe	MTOM (j)	ID elettronico	
A1 Sorvola le persone	Leggi le informazioni sui consumatori	Costruito privatamente <b>C0</b>	< 250 g	No	No
	Informazioni sui consumatori Formazione online Test online	<b>C1</b>			
A2 volare vicino alle persone	A1 + test teorico in un centro riconosciuto dalla NAA	<b>C2</b>	<4 kg	Si + Identificazione SN univoca	Si
A3 volare lontano dalle persone	Informazioni sui consumatori	<b>C3</b>	< 25 kg	Se richiesto dalla zona di operazioni	
	Formazione online Test online	Costruito privatamente <b>C4</b>			

Il traffico di classe RPAS è un insieme di procedure operative e capacità di sistemi di regole di volo applicabili all'RPAS, l'operatore RPAS durante l'esecuzione di una missione nella porzione di spazio aereo e ai servizi applicabili in tale spazio aereo. In questa registrazione è inclusa l'autorizzazione iniziale per *Beyond Visual Line-of-Sight (BVLOS)* che sono fondamentali per molte di queste operazioni per essere opportunità economicamente valide.

Questo regolamento quadro ha tenuto conto degli sviluppi sulla scena internazionale, Ad esempio, lavoro svolto nell'ICAO, nelle autorità congiunte per l'elaborazione delle regole dei sistemi senza equipaggio (JARUS) e, naturalmente, negli Stati Uniti (Federal Aviation Administration - FAA). Le regole dell'aria non saranno adottate per il funzionamento RPAS di basso livello mantenendo il confine di 1 km

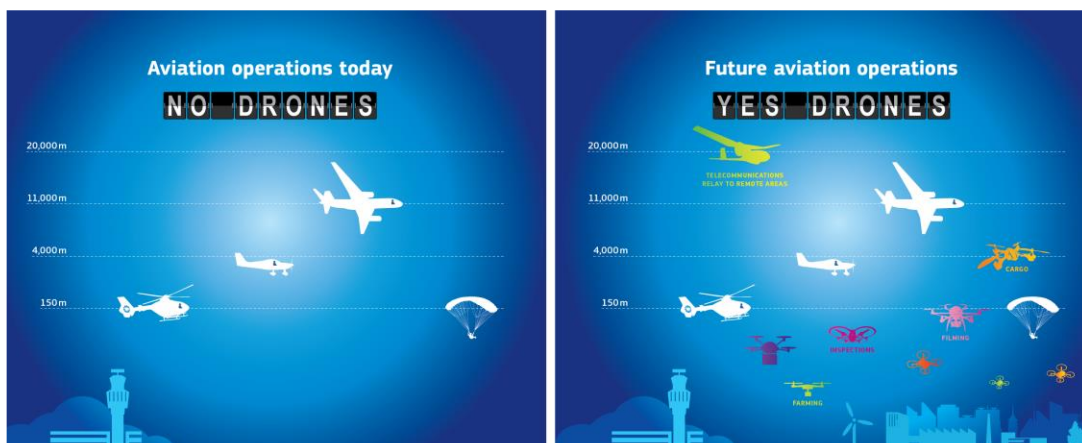


Figura 26 - Spazio aereo con regolazione dei droni, Fonte: Infografica UAV dell'EASA

come implementato in tutto il mondo. Sotto questo limite, lo spazio aereo sarà rivoluzionato Figura 26.



Figura. 27 - U-Space:  
<https://www.sesarju.eu/U-space>

Un altro passo fondamentale nella regolamentazione dello spazio aereo è la dichiarazione di Amsterdam del 2018 sul mercato europeo dei servizi di drone, che si centra su **Spazio U - Gestione (Spazio senza equipaggio)**. La dichiarazione di Amsterdam esorta le istituzioni europee e l'industria a proseguire i buoni progressi verso la realizzazione del mercato comune europeo dei servizi di drone. L'obiettivo è quello di fornire sostegno a Le Membro Stati membri nell'attuazione delle normative europee sui droni e per sviluppare, in stretta collaborazione con gli Stati membri e tutte le parti interessate, un quadro istituzionale per un mercato competitivo dei servizi u-space Per creare un oggetto Cielo unico europeo. Inoltre, fornisce sostegno alla città nei loro sforzi per fornire un terreno fertile per soluzioni multimodali innovative, integrare la terza dimensione nella loro pianificazione urbana processi;

In particolare, lo **spazio U copre** altitudini fino a 150 m e l'obiettivo è la registrazione degli operatori UAV, la loro identificazione elettronica e geofencing. Il concetto di base è quello di sviluppare un sistema che fornisca informazioni su UAV altamente automatizzato o autonomo per volare in sicurezza ed evitare ostacoli o collisioni, simile a quello della gestione del traffico aereo per l'aviazione con equipaggio. Diversi livelli di servizi sono definiti nel Progetto U-space (SESAR, 2017) come rappresentato nella Figura Figura 28 in tempo reale del volo UAV utilizzando l'identificazione elettronica.

tabella 4 - Servizio u-spaces

Livello U-Space	Servizi	Data
<b>Servizi di fondazione U1</b>	registrazione elettronica identificazione elettronica geofencing	2019
<b>U2 servizi iniziali</b>	Gestione delle operazioni con droni Interfacce procedurali con il controllo del traffico aereo	2022
<b>Servi avanzati U3</b>	Funzionamento complesso Gestione della capacità Rileva ed evita (DAA)	2027
<b>U4 servizi completi</b>	Interfaccia integrata con l'aviazione con equipaggio Connettività e digitalizzazione per drone e sistema U-Space	2035

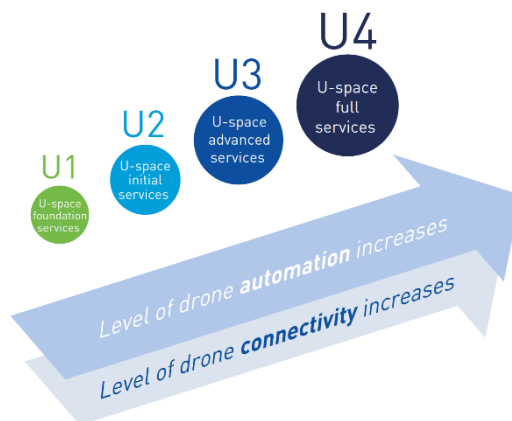


Figura 28 - Livello dei servizi nello spazio u

### 2.5.2 Italia - Enac

ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile) è il regolatore responsabile della gestione dello spazio aereo in Italia. Questa autorità aeronautica, come tutti i paesi dell'Unione europea, aggiornerà il regolamento nazionale secondo il quadro europeo dal 2019 al 2022. Regolazione effettiva "Regolamento Sistemi Aerei Un Pilotaggio Remoto" pubblicato il 21-05-2018 è riassunto in Tabella 5.

Tabella 5 - Regolamento UAV Italia, Fonte: European Drones Outlook Study 2016, EASA  
Italy

<b>Weight Limit</b>	As per EASA Basic Regulation Annex I
<b>Categories</b>	Yes: 0.3 kg/ 2 kg / 25 kg
<b>License</b>	From 01.04.2016. Pilot Certificate for VLOS and < 25kg. [if < 0,3 kg, < 60km/h and rotors protection, no pilot certificate]. Otherwise Pilot License. Medical class LAPL for Pilot Certificate and medical class 3 for Pilot License
<b>VLOS</b>	Yes, EVLOS possible
<b>BVLOS</b>	Yes
<b>Height Limit</b>	VLOS: max 150 m
<b>Operational limitations</b>	Non-critical: > 150 m from congested area, 50 m from persons and property, in uncontrolled airspace, outside ATZ and > 5 km from airport. Subclasses exist
<b>Remarks</b>	ID plate on RPA and RPS. Simpler approval procedure for < 2 kg. No dangerous goods. Registration required > 25 kg. Requirements for privacy and data protection.

Il processo di attuazione progressiva della regolamentazione europea è già iniziato e terminerà entro il 2022, come in ogni autorità nazionale per l'aviazione dell'UE.

### 2.6 Applicazione in AEC (Ingegneria e Costruzione dell'Architettura)

La tecnologia senza pilota e la robotica in generale, hanno diverse applicazioni rivoluzionarie in ogni settore migliorando l'efficienza, riducendo tempi e costi, sicurezza e innumerevoli compiti.

Gli UAS vengono utilizzati per ottenere un set desiderato di informazioni o per eseguire una missione specifica, quindi l'applicazione correlata spazia dalla semplice acquisizione dei dati alla misurazione scientifica precisa e alle operazioni complesse. Questa gamma di applicazioni corrisponde ad un'ampia gamma di conoscenze richieste dall'operatore UAS che possono variare notevolmente da poche conoscenze sui prerequisiti a una formazione ampia e specializzata. Le operazioni sono condotte specificamente allo scopo della missione e alla raccolta dei dati richiesta prima dell'effettivo lancio degli UAS.

Oggi i produttori, i fornitori di servizi e le integrazioni delle piattaforme UAV stanno seriamente considerando il potenziale di business nei settori industriali (Rao, Gopi, & Maione, 2016). In questa sezione vengono riassunte le principali applicazioni tecniche dell'UAV nei settori e nei settori tecnici, come Figura 29, con particolare attenzione all'AEC (Architecture Engineering and Construction).

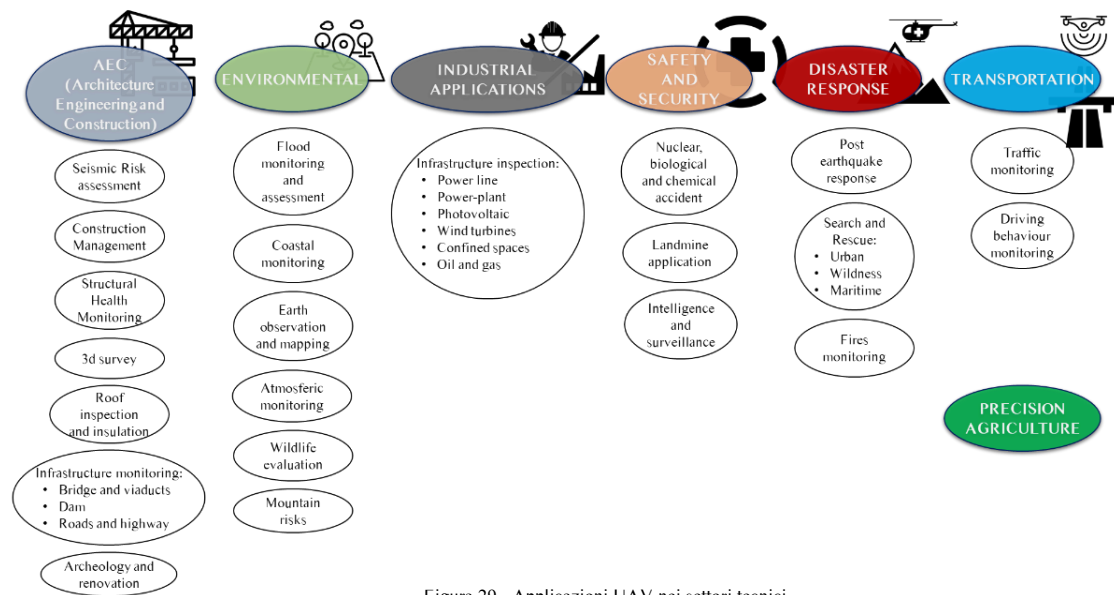


Figura 29 - Applicazioni UAV nei settori tecnici

**Ambientale**

La possibilità di montare diversi carichi utili e sensori rende l'UAV una piattaforma perfetta per acquisire e raccogliere dati ambientali e monitorare l'ambiente. La considerazione fondamentale per una raccolta dei dati sicura ed economica è come posizionare il sensore ambientale al fine di acquisire informazioni utili dalla loro posizione e / o percorso. *Dynamic Data-Driven Application Systems (DDDAS)* fornisce un mezzo per posizionare gli UAV in modo efficiente utilizzando i dati in tempo reale ottenuti dai sensori. Il framework è guidato dall'obiettivo di incorporare dinamicamente i dati ottenuti dai sensori. Inoltre, UAV consente nuove possibilità nell'indagine, nell'osservazione della terra e nell'acquisizione di dati spaziali

ambientali che forniscono una visione d'alto del territorio e una ricostruzione 3d senza ripristinare una fotogrammetria aerea classica più espansiva. L'UAV può essere utilizzato per rilevamento di aree di portata limitata come miniere aperte, piccoli fiumi, campi coltivati, non solo per monitorare l'evoluzione del suolo e i cambiamenti locali nella morfologia del terreno, ma anche per scoprire usi illegali delle risorse del suolo. L'uso di questo sistema nei settori ambientali include, ma non si limita a:

- Monitoraggio e valutazione delle alluvioni
- Monitoraggio costiero
- Osservazione e mappatura della Terra
- Monitoraggio atmosferico
- Valutazione della fauna selvatica
- Rischi per la montagna

### Ispezione industriale

I siti industriali contengono spesso aree e strutture di difficile accesso o pericolose per l'uomo. UAV può essere molto utile per ispezionare l'infrastruttura in cui l'ispezione con equipaggio è pericolosa, riducendo i costi operativi ed eseguire il processo di monitoraggio, grazie alla possibilità di pilotare a distanza il veicolo. Oltre ai costi e ai tempi ridotti, l'UAS non rappresenta un pericolo per gli aircrews, può operare in condizioni meteorologiche diverse ed è meno invadente per le comunità o gli animali vicini. La possibilità di trasportare un sensore elettro-ottico o termico come sensore e flusso in video in tempo reale è un altro vantaggio principale. Le ispezioni industriali UAV possono essere segmentate in: Ispezioni locali in loco eseguite operando in VLOS a un'altitudine inferiore (in genere inferiore a 150 m) e ispezioni di utilità a lungo raggio che operano in BVLOS ad altitudine più elevata. Le seguenti infrastrutture possono essere monitorate e ispezionate per garantire l'affidabilità e la sicurezza della struttura:

- Linea elettrica
- Centrale elettrica
- Moduli fotovoltaici (utilizzando termocamere)
- Turbine eoliche
- Ritmi Sconfinati
- Petrolio e gas

### Sicurezza

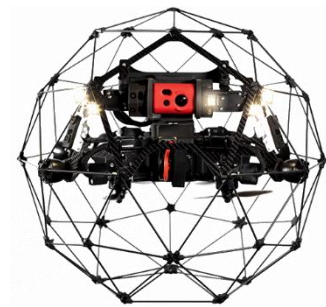


Figura 30 - UAV per l'ispezione industriale



UAV può essere utilizzato in situazioni di sicurezza pubblica pericolose che Conveniente soluzione con un alto ritorno sull'investimento per gli enti pubblici locali. Tre applicazioni della tecnologia UAS per la sorveglianza e la sicurezza sono: rilevamento stazionario da parte di rotorcraft che vengono azionati in loco utilizzando sistemi tethered che garantiscono un'autonomia illimitata (Figura 31);



Figura 31 - UAS tethered per l'applicazione della sorveglianza

Il rilevamento a lungo raggio in VLOS o BVLOS ha operato ad altitudini di circa 150 m per raccogliere dettagli precisi con ottiche zoom dedicate (Figura 32) o per migliorare aree più grandi nell'ambito della sicurezza delle frontiere, della sorveglianza marittima e della

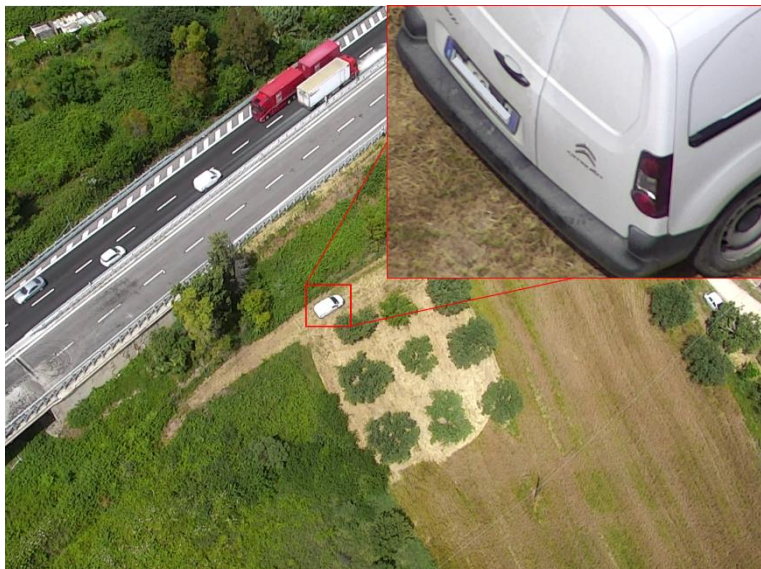


Figura 32 - Operazione di sorveglianza mediante UAS

protezione ambientale.

Incidente nucleare biologico e chimico (NBC), il rilevamento delle mine terrestri è un altro esempio del teaming di sistemi con equipaggio e senza equipaggio. In queste due situazioni, è spesso necessario mappare aree difficili o impossibili da raggiungere per le persone.

Questi compiti sono un'applicazione tipografica del sistema robotico, evitando rischi per la vita di tecnici ed esperti.

### **Disastro esoccorso**

Le catastrofi naturali rappresentano un fattore importante che influisce sulla vita e sullo sviluppo umano e, quando si verifica, la questione più cruciale da risolvere è legata alla vita umana. In questo contesto, il tempo è un fattore critico perché l'operazione di ricerca e soccorso deve essere condotta in modo rapido ed efficiente nelle prime 72 ore critiche dopo il disastro. L'UAV potrebbe essere utilizzato per la ricerca di civili in diversi scenari, selvaggia urbana o marina, e la possibilità di utilizzare diversi carichi utili (ad esempio termici) è un fattore cruciale per questa operazione. L'obiettivo in questa fase iniziale, oltre a S&R è anche quello di ottenere rapidamente i dati delle zone interessate nei primi istanti dopo il disastro: l'aereo potrebbe essere inviato in un luogo in cui è previsto un impatto elevato ed eseguire la prima valutazione prima che venga implementata qualsiasi risposta e risorse. Questo potrebbe essere utile per conoscere la condizione prima di qualsiasi intervento (Erdelj & Natalizio, 2016) e ricostruire la scena per l'indagine e l'analisi post-evento. La valutazione iniziale includerebbe i danni nella zona di emergenza, nonché le condizioni della rete di trasporto per assistere nella pianificazione della distribuzione delle risorse. La destinazione e il percorso potrebbero essere impostati secondo la valutazione iniziale. La possibilità di raccogliere dati in tempo reale e ottenere informazioni preziose è fondamentale per organizzare un intervento post-disastro rapido e riuscito.

È possibile proporre un ciclo di vita operativo in tre fasi in cui gli UAV partecipano alla gestione delle catastrofi naturali:

1. Preparazione pre-disastro per quanto riguarda gli eventi relativi al rilevamento per la creazione di un *sistema di allarme rapido (EWS)*.
2. Valutazione delle catastrofi che fornisce consapevolezza sezionale durante un disastro in tempo reale e completa gli studi sui danni per la pianificazione logistica
3. Risposta e ripristino di emergenza, compresa la missione di ricerca e soccorso.
4. Analisi post-disastro utilizzando dati fotografici e video e fotogrammetria o ricostruzione di scene 3d.

Ogni fase impone una serie di richieste di attività agli UAV con tempi diversi. Le immagini ad alta risoluzione e le informazioni fotogrammetriche raccolte possono essere utilizzate per produrre mappe di pericolo e mappa post-disastro per pianificare rapidamente l'intervento. In questa direzione, i progressi nella strumentazione UAV e nell'informatica hanno permesso un prezioso strumento per una risposta rapida: creazione di mappe semi-automatizzate e completamente automatizzate.

Le principali sfide nell'uso dell'UAV nella risposta alle catastrofi sono rappresentate dalla mancanza di infrastrutture per la comunicazione in questo scenario e dalla difficoltà della trasmissione in tempo reale. L'identificazione e la definizione delle priorità delle informazioni critiche dovrebbero inoltre essere stabilite affinché gli UAV raccolgano dati nelle diverse fasi della risposta alle catastrofi.

### **Trasporto**

L'uso di UAV può aiutare nella raccolta di informazioni relative ai trasporti (Kanistras et al., 2013, Salvo et al., 2014). Due al flusso dinamico, ambiente incerto e informazioni ampiamente diffuse in termini di area geospaziale e tempo, il monitoraggio del traffico richiede una piattaforma flessibile come UAV. Questo veicolo può fornire una visione globale di strade e autostrade con informazioni pertinenti come il monitoraggio in tempo reale, la stima del tempo di viaggio, le traiettorie, la risposta all'incidenza degli annunci. Inoltre, UAV può anche fungere da sistema on-demand per una situazione imprevista come un incidente all'acquisizione di dati o al kit di pronto soccorso per il trasporto. L'integrazione dell'UAV per migliorare il sistema di monitoraggio del traffico che serve una spina dorsale *dell'infrastruttura ITS (Intelligent Transportation System)*.

Il monitoraggio del comportamento alla guida può anche essere migliorato utilizzando questa piattaforma nella ricerca, per raccogliere una traiettoria del veicolo accurata e dettagliata. La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) degli Stati Uniti ha identificato sei metriche chiave che devono essere quantificate per determinare e quantificare potenziali comportamenti scorretti: ID, velocità, distanza in avanti, cambio di corsia, tempo di cambio corsia e accelerazione. Il calcolo di queste metriche cruciali può essere automatizzato utilizzando l'algoritmo di visione artificiale (Zheng, Breton, Iqbal e Sadiq, 2015). Tre delle principali sfide di questi usi sono legate alla capacità di elaborare una grande quantità di dati (Rathinam, Kim, & Sengupta, 2006), all'accessibilità economica del sistema e dell'interfaccia di comunicazione e alla capacità di tenere la telecamera in vista della strada per un lungo periodo.

**Agricoltura di precisione:** l'agricoltura di precisione è una tendenza innovativa nella gestione delle aziende agricole, ed è considerata l'applicazione di mercato più significativa di UAV, grazie ai principali vantaggi legati all'aumento della produzione. Questa tecnica prevede l'applicazione di analisi geospaziali e sensori per identificare le variazioni nel campo e affrontarle utilizzando strategie alternative (C. Zhang & Kovacs, 2012, Raeva, et al., 2018). Nella ricerca agronomica, nuovi prodotti e sostanze vengono testati sul campo, con ispezioni ad alta intensità di manodopera tipicamente settimanali delle proprietà fogliari da parte di personale esperto. La valutazione della pianta, in questo metodo qualitativo, si basa su dimensioni,

condizione e numero di una foglia vegetale. L'uso di UAV è più flessibile, preciso ed economico per raccogliere i dati necessari per l'analisi e l'azione consecutiva. Nell'uso dell'UAV per l'agricoltura di precisione possono essere identificati due diversi tipi di missione primaria: *irrelevamento* a lungo raggio, utilizzato per raccogliere dati attraverso il telerilevamento ad un'altitudine di 150 m e gli UAV a *carico* utile leggero a lungo raggio per spruzzare con precisione sostanze chimiche (Sheba & Gladston Raj, 2018, Garre & Harish, 2018) a un'altitudine inferiore a 50 m.

I settori non tecnici comprendono, in modo non esaustivo:

**Riprese aeree e fotografia:** Cinema, Immobiliare, Marketing, News reporting.

**Spettacolo, comunicazione e intrattenimento** (Santamarina-Campos e Segarra-Oña, 2018)

### 2.6.1 Applicazione in ingegneria e costruzione dell'architettura



Figura 33 - Applicazione UAV in cantiere

Architecture Engineering and Construction (AEC) è un settore complesso in cui l'innovazione è solitamente lenta a causa di metodi e tecniche consolidate, della complessa catena di approvvigionamento e dell'ambiente che influenzano l'intero processo (Pries & Janszen, 2006, Winch, 2010, McKinsey Company, 2015). Il management svolgerà un ruolo sempre più cruciale nel settore delle costruzioni e la principale applicazione UAV in questo settore è strettamente legata alla gestione dei cantieri (Dupont et al., 2017, Wen & Kang, 2014). UAV avrà diverse applicazioni nelle opere di ingegneria civile (Liu et al., 2014,

Douglas M. et al., 2016, Sebbane, 2018) e può contribuire alla digitalizzazione di questo settore insieme ad altre tecnologie (Vacanas et al., 2015), per ridurre tempi e costi.

L'idea principale è utilizzare l'UAV come elemento per raccogliere e ottenere informazioni utili e affidabili utilizzando un veicolo dinamico, mobile e presto autonomo per eseguire attività ripetitive ed a basso valore. L'elaborazione e l'estrazione di informazioni utili dai dati acquisiti è la chiave per una rapida e preziosa integrazione di questi sistemi. La possibilità di raccogliere, rilevare, estrarre automaticamente le informazioni pertinenti e, in futuro, di agire, sarà il punto di svolta nell'uso di questa tecnologia.

Di seguito riassunte alcune delle principali applicazioni e sottodiscipline dell'ingegneria civile in cui le applicazioni UAV possono produrre grandi benefici:

#### **Valutazione del rischio sismico**

L'utilizzo dell'UAV svolge un ruolo chiave nella mitigazione e nell'analisi dei rischi per la valutazione del rischio sismico di edifici e infrastrutture. I parametri per l'analisi dei rischi sono specifici del progetto e generalmente raccolti utilizzando immagini satellitari, tecnologia GPS o ispezione visiva da parte di un tecnico. La possibilità di raccogliere dati sull'inventario degli edifici (che di solito non sono accessibili, o appartengono al governo) in modo economico, veloce e meno ad alta intensità di manodopera è fondamentale per la valutazione del rischio sismico. I progetti e le informazioni geografiche di solito non sono disponibili al pubblico, ma le caratteristiche geometriche della costruzione e dell'infrastruttura possono essere ottenute da un sondaggio su medio / grande scala eseguito con UAV. L'analisi dei dati e l'estrazione automatica delle funzionalità (come dimensioni e numero di storie) da immagini e video utilizzando la visione artificiale, per automatizzare e velocizzare il processo, è un open-point (Crommelinck et al., 2016).

Inoltre, informazioni spaziali affidabili possono essere utilizzate per calcolare la curva di fragilità, creare database affidabili sulla fragilità sismica per eseguire analisi spaziali per lo scenario post-terremoto. L'uso di dati deterministici migliora l'affidabilità dei risultati della valutazione. Inoltre, l'indagine post sisma e l'osservazione dei danni strutturali, tradizionalmente eseguite da tecnici, potrebbero essere migliorate grazie all'utilizzo dell'UAV (Fernandez Galarreta F. et al., 2015).

#### **Gestione delle costruzioni**

Progetti di costruzione più grandi come infrastrutture civili, ponti, viadotto, dighe e impianti di solito richiedono il coordinamento di centinaia di lavoratori e pezzi di macchine da costruzione nello stesso

sito. Con l'utilizzo di UAV, i responsabili delle costruzioni possono monitorare l'intero sito con maggiore visibilità, da remoto, senza vincoli di accessibilità (Irizarry, Ph, Asce, Costa, & Ph, 2015) ottenendo dati per tracciare i progressi della costruzione (Rakha & Gorodetsky, 2018). La visione globale del sito è utile anche per avere una chiara prospettiva dell'intero progetto, eseguire analisi dei rischi e per motivi di salute e sicurezza per prevenire un incidente, monitorando costantemente lavoratori e cantieri (Siebert & Teizer, 2014).

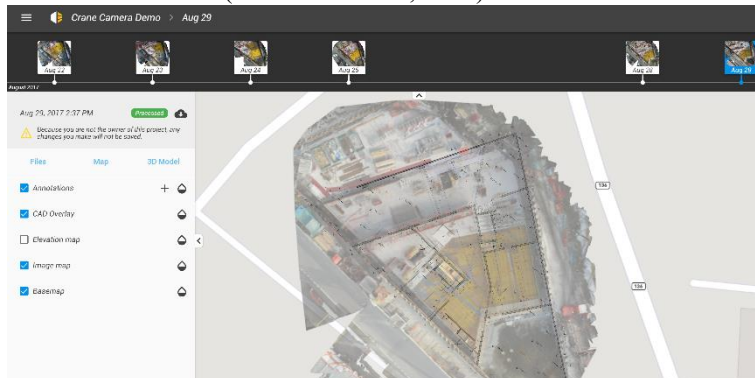


Figura 34 - Avanzamento dei lavori di costruzione, Fonte: Pix4d

Una rappresentazione tipica del cantiere comprende come documentazione costruita e progetti di progetto - spesso fotografia dal tecnico in loco per monitorare i progressi della costruzione su base fissa e computer-generare immagini 3D. L'utilizzo di UAV consente l'utilizzo di fotografia aerea, ortofoto modello 3D con strumenti di misurazione built-in, disegno CAD e sovrapposizione di mappe, analisi dello stato di avanzamento della timeline (Figura 34) e ispezione virtuale remota (esterna e interna) durante i lavori. Inoltre, UAS riduce i rischi di lesioni da parte dei lavoratori, migliora gli sforzi di gestione e migliora la qualità della produttività in loco. Le principali sfide in uso per la gestione delle costruzioni consistono nell'affidabilità del volo nei cantieri che presentano restrizioni come ostacoli e flusso d'aria instabile e nella possibilità di ottimizzare dinamicamente la pianificazione del percorso e del percorso. La trasmissione di immagini video in tempo reale è un'altra sfida che sarà superata dall'uso di nuove infrastrutture di telecomunicazione.

### Salute strutturale e monitoraggio (SHM)

Il monitoraggio strutturale della salute è una componente dell'ingegneria civile per la verifica della sicurezza e dell'integrità della struttura civile. Le condizioni della struttura sono generalmente monitorate utilizzando sensori e sistema di rilevamento. Tuttavia, grandi quantità di immagini, video e informazioni sugli spazi 3D possono essere acquisite molto rapidamente utilizzando UAV con diversi sensori che garantiscono la corretta caratterizzazione della condizione esistente (Sankarasrinivasan, et al., 2015). Inoltre,

importanti dettagli strutturali di edifici e ponti possono essere acquisiti con sensori di zoom da lontano soprattutto in ponti e viadotti difficili da raggiungere (Figura 35)



Figura 35 - Dettaglio congiunto dell'indagine UAV zoom con 30x

L'esecuzione di acquisizioni continue e regolari può contribuire a monitorare le condizioni SH di una struttura specifica durante il tempo. L'UAV autonomo può sbloccare il potenziale del monitoraggio continuo, eseguendo lo stesso modello pre-programmato su base dipendente dal tempo. Inoltre, il riconoscimento degli oggetti dei dati acquisiti può facilitare l'integrazione e il monitoraggio in un ambiente BIM (Stati e Stati, 2017). L'obiettivo di una procedura di monitoraggio delle prestazioni visive guidata da UAV è:

1. Raccogliere immagini o video dalle visualizzazioni più informative in un sito di progetto
2. Analizzarli con o senza modelli informativi per edifici a priori per ragionare sulle deviazioni delle prestazioni durante la costruzione
3. Monitorare le operazioni in corso per la produttività e la sicurezza
4. Caratterizzare l'attuale stato delle infrastrutture civili
5. Visualizzare e comunicare lo stato di avanzamento dei lavori più aggiornato con i partecipanti al progetto in loco e fuori sede.

#### **Indagine e mappatura 3d (acquisizione dati)**

La disponibilità di telecamere sensore, tecniche di fotogrammetria e software danno la possibilità di ottenere ricostruzioni 3d di alta qualità e ortofoto dell'edificio, aree di intervento e interi cantieri. Questa ricostruzione 3d è diventata essenziale per l'applicazione di mappatura non tradizionale. L'uso di UAS (con GPS, pianificazione della missione e percorso pre-programmato) e piattaforma di mappatura

mobile emergente, ingenerale, fornisce ulteriori vantaggi economici e pratici. L'utilizzo di rotorcraft per catturare immagini e video combinati con la fotogrammetria consente la creazione di nuvola di punti 3d della scena, Modello di elevazione digitale (DEM) (Uysal et al., 2015) e modello di superficie digitale (DSM), modello 3d strutturato, ortofoto, linee di contorno e dati vettoriali in modo semi-automatizzato o completamente automatizzato (Remondino, et al., 2012). Inoltre, l'uso di UAV ha migliorato la possibilità di ottenere una documentazione precisa così come costruita e accelerare l'acquisizione del processo e il monitoraggio degli edifici (Eschmann et al., 2012). In questo processo di acquisizione, climate e condizioni esterne hanno un impatto diretto sul tempo richiesto e sulla possibilità di eseguire le operazioni, inoltre, la qualità dei risultati è direttamente influenzata dalle caratteristiche del sensore, dalla stabilità del volo UAV e dall'efficienza elettronica. L'ispezione e l'accurata indagine specifica sono possibili anche in un edificio alto o in una struttura verticale (Russo et al., 2018) come grattacielo (Roca et al., 2013).

#### **Ispezione e isolamento del tetto**

Nella manutenzione degli edifici, l'ispezione del tetto rappresenta una sfida a causa dei rischi legati al lavoro in altezza e talvolta all'inaccessibilità del luogo. Gli UAV dotati di una telecamera ad alta risoluzione possono essere utilizzati per raccogliere dati come immagini e video per eseguire un'ispezione visiva e termocamere per rappresentare graficamente l'inefficienza energetica nel tetto (Figura 36). L'identificazione della variazione di temperatura all'interno dell'edificio è utile per trovare rapidamente aree di isolamento umido e potenziali perdite. La sensibilità termica o differenza di temperatura equivalente al rumore (NETD) è la misurazione della più piccola differenza di temperatura che le immagini termiche possono rilevare in presenza di rumore elettronico. Le immagini termiche ad alta sensibilità (e a bassa NETD) mostrano più differenze di temperatura e quindi più modelli.

Minore è la sensibilità termica, più dettagliato e meno rumore presente sul termogramma. Le immagini ad alta risoluzione sono necessarie quando si osserva il tetto da una distanza maggiore, ad esempio nel cavalcavia.



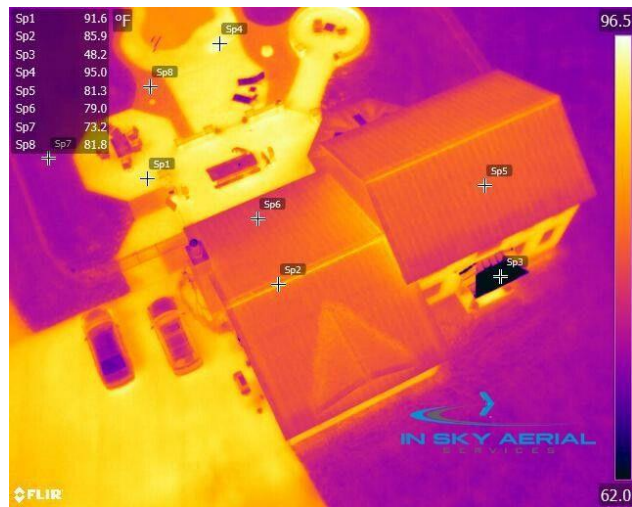


Figura 36 - Immagine termica acquisita con UAS

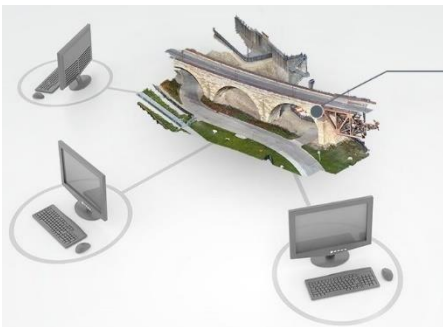


Figura 37 - Ispezione virtuale dell'erisoren  
Fonte: Pix4d

### Monitoraggio delle infrastrutture

Le infrastrutture civili come ponti e viadotti, dighe, strade e autostrade sono sistemi complessi con rischi molto elevati associati al loro collasso. Per questo motivo, nonostante l'elevata durata del progetto, richiedono un monitoraggio continuo, un'ispezione e un funzionamento di manutenzione, per garantire sicurezza e utilizzo continuo. L'ispezione visiva richiede molto tempo, l'interruzione delle operazioni per eseguire analisi, attrezzature specializzate e tecnici qualificati che seguono linee guida standardizzate. La necessità di una soluzione migliore, discussa in profondità nel capitolo 4, porta all'uso dell'UAV come strumento perfetto per il rilevamento e l'ispezione. I dati possono essere ottenuti facilmente, senza alcuna interruzione del funzionamento e dei lavori, e possono essere post-elaborati utilizzando software e tecnologie specializzate come la Realtà Virtuale (VR) e la Realtà Mista (MR) (Karaaslan, Bagci, & Catbas, 2018).

Le principali sfide che devono essere affrontate, analizzate nel presente lavoro, riguardano il piano di acquisizione, la navigazione attraverso un ambiente e una struttura complessi, una metodologia per acquisire dati preziosi e una metodologia per la ricostruzione 3D e l'analisi post-processo. Inoltre, la natura intrinseca di una missione di ispezione strutturale che utilizza UAV implica l'interazione di diversi settori, tra cui la stabilizzazione e il controllo UAV, l'eliminazione degli ostacoli alla navigazione, la comunicazione senza fili, il GPS e la navigazione computerizzata.

## Bibliografia

- Albetis, J., Jacquin, A., Goulard, M., Poilvé, H., Rousseau, J., Clenet, H., ... Duthoit, S. (2018). Sulla potenzialità delle immagini multispettrali UAV per rilevare le malattie del tronco di flavescenza dorée e vite. *Telerilevamento*, 11(1), 23.
- Berni, J., Zarco-Tejada, P., Suárez, L., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2009). Telerilevamento della vegetazione da piattaforme UAV utilizzando sensori leggeri multispettrali e di imaging termico. *Archivi internazionali di fotogrammetria, telerilevamento e scienze dell'informazione spaziale*, 38(settembre), 1-6.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Valutazione di immagini multispettrali e indici di vegetazione per applicazioni di agricoltura di precisione da immagini UAV. *Telerilevamento*, 7(4), 4026-4047.
- Chen, H., Wang, X., & Li, Y. (2009). Un'indagine sul controllo autonomo per UAV. In *Intelligenza Artificiale e Intelligenza Computazionale, 2009. AICI'09. Conferenza internazionale* (Vol. 2, pp. 267-271).
- Chen, S., Laefer, D. F., & Mangina, E. (2016). Revisione dello stato della tecnologia degli UAV civili. *Brevetti recenti sull'ingegneria*, 10(3), 160-174.
- Amministrazione dell'aviazione civile della Cina, C. (2017). Programma di gestione Airworthiness degli aeromobili - AP-45-AA-2017-03.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Sistemi aerei senza equipaggio per la fotogrammetria e il telerilevamento: una rassegna. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- Crommelinck, S., Bennett, R., Gerke, M., Nex, F., Yang, M. Y., & Vosselman, G. (2016). Revisione dell'estrazione automatica delle funzionalità dai dati dei sensori ottici ad alta risoluzione per la mappatura catastale basata su UAV. *Telerilevamento*, 8(8).
- Douglas M. Marshall Richard Kurt Barnhart, E. S.M.M. (2016). *Introduzione ai sistemi di aeromobili senza equipaggio* (Seconda ed.). CRC Press.
- Dupont, Q. F.M., Chua, D. K. H., Tashrif, A., & Abbott, E. L. S. (2017). Potenziali applicazioni dell'UAV lungo la catena del valore della costruzione. *Procedia Engineering*, 182(3), 165-173.
- EASA (Agenzia europea per la sicurezza aerea). (2017). NPA 2017-05 (B) Introduzione di un quadro normativo per il funzionamento dei droni Operazioni del sistema aereo senza equipaggio nella categoria aperta e specifica, 05(01), 128. Recuperato da [https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/NPA\\_2017-05\\_%28B%29.pdf](https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/NPA_2017-05_%28B%29.pdf)
- Erdelj, M., & Natalizio, E. (2016). Gestione delle catastrofi assistita da UAV: applicazioni e problemi aperti. *Conferenza Internazionale 2016 su Informatica, Networking e Comunicazioni, ICNC 2016*.
- Eschmann, C., Kuo, C.-M., & Boller, C. (2012). Sistemi di aeromobili senza equipaggio per l'ispezione e il monitoraggio remoto degli edifici. *Atti del 6° Workshop Europeo sul Monitoraggio Strutturale della Salute, 3-6 luglio 2012, Dresda, Germania*, 2, 1-8.
- Agenzia europea per la sicurezza aerea (AESA). (2015). Agenzia europea per la sicurezza aerea Introduzione di un quadro normativo per il funzionamento degli aeromobili senza equipaggio, 1-50.
- P. G. Fahlstrom, & Gleason, T. J. (2012). *Introduzione al sistema UAV*.
- Previsioni federali per l'amministrazione aeronautica aerospaziale. (2016). Previsioni FAA Aerospace. *FAA Aerospace*, 91.
- Fernandez Galarreta, J., Kerle, N., & Gerke, M. (2015). Valutazione dei danni strutturali urbani basata su UAV utilizzando l'analisi dell'immagine basata su oggetti e il ragionamento semantico. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1087-1101.
- Garre, P., & Harish, A. (2018). UAV di irrorazione autonoma di pesticidi agricoli. *Serie di conferenze IOP: Scienza e ingegneria deimateriali*, 455, 012030.
- Gimenes, R. A. V., Vismari, L. F., Avelino, V. F., Camargo, J.B., De Almeida, J. R., & Cugnasca, P. S. (2014). Linee guida per l'integrazione degli UAS autonomi nel global ATM. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*.

- Gonzalez, L. F., Montes, G. A., Puig, E., Johnson, S., Mengersen, K., & Gaston, K. J. (2016). Veicoli aerei senza equipaggio (UAV) e intelligenza artificiale che rivoluziona il monitoraggio e la conservazione della fauna selvatica. *Sensori (Svizzera)*, *16*(1).
- Irizarry, J., Ph, D., Asce, M., Costa, D.B., & Ph, D. (2015). Studio esplorativo delle potenziali applicazioni dei sistemi aerei senza equipaggio per compiti di gestione delle costruzioni, *2*, 1–10.
- Kanistras, K., Martins, G., & Rutherford, M. J. (2013). Un'indagine sui veicoli aerei senza equipaggio (UAV) per il monitoraggio del traffico, 221-234.
- Karaaslan, E., Bagci, U., & Catbas, F. N. (2018). Valutazione dell'infrastruttura assistita dall'intelligenza artificiale utilizzando sistemi di realtà mista. *Serigrafia ArXiv*, arXiv:1812.05659.
- Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y. N., Han, J. Y., Lai, J. S., Kang, S.C., ... M. H. Tsai (2014). Una revisione degli sviluppi e delle applicazioni del veicolo aereo senza pilota (UAV) del rotorcraft nell'ingegneria civile. *Strutture e sistemi intelligenti*, *13*(6), 1065-1094.
- Lu, H., Li, Y., Mu, S., Wang, D., Kim, H., & Serikawa, S. (2018). Rilevamento di anomalie motorie per veicoli aerei senza equipaggio utilizzando l'apprendimento del rinforzo. *IEEE Internet of Things Journal*, *5*(4), 2315–2322.
- Luis Rodolfo Garcia Carrillo, Alejandro Enrique Dzul Lopez, R. L. e C. P. (2012). *Quod Rotorcraft Control: Hovering e Navigazione basati sulla visione*, (Springer).
- Ma'sum, M. A., Arrofi, M. K., Jati, G., Arifin, F., Kurniawan, M. N., Mursanto, P., & Jatmiko, W. (2013). Simulazione di un veicolo aereo intelligente senza equipaggio (uav) per la sorveglianza militare. In *Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), Conferenza Internazionale 2013 SU* (pp. 161-166).
- McKinsey Company, . (2015). L'imperativo della produttività delle costruzioni(giugno).
- Pinter, P. J., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E.M., Moran, M. S., Daughtry, C. S. T., & Upchurch, D. R. (2003). Telerilevamento per la gestione delle colture, *69*(6), 647-664.
- A. K. Prasad, Chai, L., Singh, R. P., & Kafatos, M. (2006). Modello di stima della resa delle colture per l'Iowa utilizzando il telerilevamento e i parametri di superficie, *8*, 26–33.
- F. Pries, F., & Janszen, F. (2006). Gestione delle costruzioni ed economia Innovazione nel settore edile: il ruolo dominante dell'ambiente Innovazione nel settore edile: il ruolo dominante dell'ambiente, (marzo 2013), 37-41.
- Raeva, E. P., Šedina, E. J., & Dlesk, E. A. (2018). Tecniche di fotogrammetria UAV per l'agricoltura di precisione. *Atti, 7a Conferenza Internazionale sulla Cartografia e GIS 2018*, (giugno).
- Rakha, T., & Gorodetsky, A. (2018). Revisione delle applicazioni UAS (Unmanned Aerial System) nell'ambiente costruito: verso procedure automatizzate di ispezione degli edifici utilizzando droni. *Automazione nell'edilizia*, *93*(maggio), 252-264.
- Rao, B., Gopi, A. G., & Maione, R. (2016). L'impatto sociale dei droni commerciali. *Technology in Society Journal*.
- Rathinam, S., Kim, Z., & Sengupta, R. (2006). Vision Based Following of Structures using a UAV, (March).
- Reg Austin. (2010). *Sistemi aerei senza equipaggio. Fattori umani nell'aviazione*.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2012). Fotogrammetria Uav per la mappatura e la modellazione 3D - Stato attuale e prospettive future. *ISPRS - Archivi internazionali di fotogrammetria, telerilevamento e scienze dell'informazione spaziale, XXXVIII-1/25-31*.
- Roca, D., Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Armesto, J., & Arias, P. (2013). Unità aerea a basso costo per l'ispezione all'aperto delle facciate degli edifici. *Automazione nell'edilizia*, *36*, 128–135.
- Russo, M., Carnevali, L., Russo, V., Savastano, D., & Taddia, Y. (2018). Modellazione e mappatura del deterioramento delle facciate nel contesto urbano storico mediante fotogrammetria UAV ultraleggera a distanza ravvicinata. *International Journal of Architectural Heritage*, *00*(00), 1–20.
- Salvo, G., Caruso, L., & Scordo, A. (2014). Analisi del traffico urbano attraverso un UAV. *Procedia - Scienze Sociali e Comportamentali*, *111*, 1083-1091.
- Sankarasrinivasan, S., Balasubramanian, E., Karthik, K., Chandrasekar, U., & Gupta, R. (2015).

- Monitoraggio sanitario delle strutture civili con UAV integrato e sistema di elaborazione delle immagini. *Informatica Procedia*, 54, 508–515.
- Santamarina-Campos, V., & Segarra-Oña, M. (2018). *Droni e industria creativa*. Springer International Publishing.
- Sebbane, Y.B. (2016). *Smart Autonomous Aircraft*. CRC Press.
- Sebbane, Y.B. (2018). *Autonomia intelligente di UAVS*. Chapman & Hall/CRC.
- Sesar. (2017). Progetto u-space - Impresa comune SESAR.
- Sheba, Regno Unito, & Gladston Raj, S. (2018). Algoritmo di pulizia dei dati efficiente e innovativo algoritmo di identificazione univoca dell'utente utilizzando hashing e binario ..., (gennaio).
- Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mappatura 3D mobile per il rilevamento di progetti di lavori di terra utilizzando un sistema UAV (Unmanned Aerial Vehicle). *Automazione nell'edilizia*, 41, 1-14.
- R. Stark (2000). Nuova tecnica per la stima remota della vegetazione.pdf.
- Stati Uniti e Stati Uniti, U. (2017). Valutazione del monitoraggio dei progressi costruttivi basati su VISIONE ARTIFICIALE e BIM 4D su una piattaforma UAV, 1-10.
- Stöcker, C., Bennett, R., Nex, F., Gerke, M., & Zevenbergen, J. (2017). Revisione dello stato attuale delle normative UAV. *Telerilevamento*, 9(5), 33–35. <https://doi.org/10.3390/rs9050459>
- Taylor, P., Vygodskaya, N. N., Gorshkova, I. I., & Fadeyeva, Y. V. (1989). Stime teoriche della sensibilità in alcuni indici di vegetazione alla variazione delle condizioni del baldacchino, (2007).
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). Generazione DEM con fotogrammetria UAV e analisi di precisione nella collina di Sahitler. *Misura: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 539–543.
- Vacanas, Y., Themistocleous, K., Agapiou, A., & Hadjimitsis, D. (2015). Tecnologie di modellazione delle informazioni sugli edifici (BIM) e UAV (Unmanned Aerial Vehicle) nella gestione dei progetti di costruzione dell'infrastruttura e nell'analisi dei ritardi e delle interruzioni, 9535, 1-11.
- Watts, A.C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Sistemi aeronautici senza equipaggio nel telerilevamento e nella ricerca scientifica: classificazione e considerazioni sull'uso. *Telerilevamento*, 4(6), 1671–1692.
- Wen, M.-C., & Kang, S.-C. (2014). Realtà aumentata e assistenza di veicoli aerei senza equipaggio nella gestione delle costruzioni, 1570-1577.
- Verricello, G.M. (2010). Quanto è innovativa la costruzione? Confrontando i dati aggregati sull'innovazione edilizia e altri settori – un caso di mele e pere Quanto è innovativa l'edilizia? Confronto dei dati aggregati sull'innovazione edilizia e altri settori – un caso di mele, (marzo 2013), 37-41.
- Zhang, C., & Kovacs, J.M. (2012). L'applicazione di piccoli sistemi aerei senza equipaggio per l'agricoltura di precisione: una revisione, 693-712.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). Un metodo di filtraggio dei dati LiDAR aerotrasportato di facile utilizzo basato sulla simulazione del pannello. *Telerilevamento*, 8(6), 1-22.
- Zheng, C., Breton, A., Iqbal, W., & Sadiq, I. (2015). Driving-Behavior Monitoring Using a Unmanned Aircraft System (UAS) Driving-Behavior Monitoring Using an Unmanned Aircraft System (UAS), (agosto).
- Zhou, G., Yang, J., Li, X., & Yang, X. (2012). Progressi dello sviluppo di Flash Lidar a bordo di Uav. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B3(settembre), 193-198.

### CAPITOLO III



### **3 Indagine strumentale: sensori e strumenti di acquisizione dati**

#### **3.1 Tecniche d'indagine per il monitoraggio e l'ispezione**

Le tecniche esistenti effettivamente utilizzate per il rilevamento e l'acquisizione dei dati includono: Stazioni totali (TS), sistema di posizionamento globale differenziale (dGPS), fotogrammetria, scanner laser, scansione laser aviotrasportata (ALS) e scansione laser terrestre (TLS) o Light Detection And Ranging (LIDAR). Rispetto a queste tecniche tradizionali, SfM è molto economico e veloce, può offrire informazioni veramente 3D e con un uso adeguato dei punti di controllo a terra (GCP) può competere con altri metodi di rilevamento digitale per l'accuratezza spaziale. Inoltre, con l'uso di una navigazione GNSS a bordo più precisa (ad esempio RTK-GNSS) l'accuratezza spaziale può essere migliorata.

Infatti, lo Structure from Motion rappresenta l'ultimo e significativo progresso nel rilevamento digitale, grazie alle sue caratteristiche non invasive, la possibilità di acquisire informazioni in modo rapido e con una bassa spesa economica, senza alcun contatto con l'oggetto/area da esaminare. L'uso della fotogrammetria nel rilevamento e nel monitoraggio si è diffuso negli ultimi anni grazie a una combinazione di diversi fattori: significativi progressi negli algoritmi di visione artificiale, maggiore potenza computazionale e maggiore disponibilità di strumenti per acquisire informazioni e software potenti per elaborare i dati. Un altro fattore chiave è rappresentato da numerosi vantaggi rispetto alle tecniche di rilevamento tradizionali, come la possibilità di acquisire informazioni e spostare la fase di analisi dopo l'indagine, in ufficio. Il potenziale della tecnologia è all'inizio e i miglioramenti nelle tecniche e nell'algoritmo contribuiranno alla crescita tecnologica nei prossimi anni.

Gli approcci all'acquisizione dei dati topografici digitali possono essere classificati in due tipologie principali: approcci diretti che richiedono il contatto del geometra con l'oggetto/area di interesse e metodi indiretti che consentono la misurazione di un oggetto/area pur rimanendo remoti. Ovviamente la scelta delle tecniche di indagine che il geometra dovrebbe affrontare dipende da fattori diversi, relativi ai risultati attesi quali: i) l'accuratezza e la precisione dei dati, (ii) l'uso previsto dei dati acquisiti, (iii) i vincoli come il tempo e il denaro per l'operazione e (iv) l'esperienza nell'uso sia dell'hardware che del software per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

### 3.2 Approccio di rilevamento diretto

#### Ispezione visiva

Ispezione visiva è il metodo diretto comunemente utilizzato per acquisire ponti e viadotti informativi e di indagine, eseguito da un Esperto tecnico sul posto. Si tratta di un test non dirompente che consiste su individuazione visiva dei difetti e definizione Ordinario E Straordinaria manutenzione.



Figura 3.1 - Ispezione visiva eseguita con gru

Questa ispezione si basa sul metodo di valutazione numerica per assegnare l'indice numerico di degradazione. In caso di danni gravi e complessi alla struttura, è necessario eseguire un'ispezione più approfondita con metodi distruttivi. I principali svantaggi di questo metodo consistono nell'impiego di una gru per ispezionare la sottostruttura, con un esperto in materia (figura 3.1). Durante l'indagine, il traffico e la regolare funzionalità dell'infrastruttura devono essere interrotti.

#### Stazione totale (TS)

Le stazioni totali sono gli strumenti classici e più comuni per il rilevamento topografico quando è richiesta un'elevata precisione su pochi punti (meno di 100). I principali vantaggi consistono nella possibilità di eseguire operazioni di rilevamento con una scelta accurata del punto che meglio rappresenta la topografia dell'area, in ogni condizione, anche quando la vista del cielo è limitata e in zone senza segnale GPS. La necessità di una accurata scelta dei punti dell'indagine, rende la TS il più efficiente degli approcci di rilevamento mentre dall'altra parte dipende strettamente dall'esperienza del topografo (fig.3.2). La soggettività del topografo nella scelta del punto, la necessità di visitare fisicamente tali obiettivi e di avere un accesso adeguato, e la necessità di almeno due operatori (uno alla stazione e uno all'altro punto di interesse obiettivo) rappresentano i principali svantaggi nell'uso di TS. Inoltre, le misurazioni ottenute si limitano ad



Figura 3.2 – Indagine sul ponte con Stazione totale (TS)



essere in un sistema di coordinate locali, a meno che il punto non sia "retroveitato" in un punto con caratteristiche e misurazioni "conosciute" del mondo reale.

Nel rilievo dei ponti, la necessità di accedere ai target rappresenta un grande ostacolo a causa del difficile posizionamento e delle condizioni dei ponti, di solito sono in alto, o in mezzo a fiumi o strade.

### GNSS Differenziale

L'unico modo per ottenere coordinate del mondo reale consiste nell'uso di sistemi satellitari di navigazione globale (GNSS) (fig.3.3), di solito sistema di posizionamento globale (GPS) con sede in America, Russia GLObal Navigation Satellite System (GLONASS), recentemente sistema Galileo con sede in Europa e Beidou con sede in Cina. I sistemi GNSS, e all'inizio il GPS, sono stati utilizzati per il rilevamento e la mappatura dagli anni '90 e inizialmente sono stati utilizzati per fornire punti di controllo per le tecniche di rilevamento tradizionali basate sulla triangolazione. A partire dagli anni '90 questo è stato utilizzato come metodo di rilevamento a se stesso.

Analogamente alle TS, l'acquisizione dei dati richiede a un topografo di visitare ogni punto di interesse con un ricevitore *Rover*, che invia tutte le informazioni acquisite ad una Stazione *Base*. L'accuratezza dipende dall'equilibrio tra precisione del punto e velocità di rilevamento scelta. La posizione di Rover è calcolata in tempo reale rispetto alla base che viene impostata su un treppiede su un punto noto e questa funzione in tempo reale è trasmessa tramite collegamento Radio; quindi modem e antenna radio sono necessari sia alla base che al rover. In alternativa, i dati del rover possono essere post-elaborati rispetto alla stazione base temporanea o a una stazione base permanente come quelle della Nazionale e sistema geodetico internazionale.

Due diverse modalità GPS possono essere utilizzate per il rilevamento: "Statico" o "continuo". In *modalità* statica vengono registrate e medie osservazioni multiple per punto e GNSS può essere utilizzato per acquisire fino a diverse decine di punti all'ora. Questa modalità di indagine è utile se i dati dei punti 3d derivati da GNSS vengono utilizzati come input per altri metodi di rilevamento come la ricostruzione fotogrammetria, utilizzando il punto di controllo a terra, o per convalidare e confrontare l'accuratezza dei risultati con altri metodi di indagine in *modalità continua* è possibile acquisire diverse migliaia di punti all'ora. La *modalità Cinematica* reale time (RTK) (Figura 3.4) è un tipo di indagine continua che richiede un collegamento diretto di modem radio o telefono cellulare tra ricevitore base e rover, ma ha il vantaggio di fornire l'accuratezza finale al geometra sul campo nel punto di interesse.

L'output dei dati di rilevamento GPS differenziale (dGPS) sono comunemente importati nel sistema di informazione geografica (GIS) dove il punto può essere convertito in Digital Elevation Model (DEM)



Figura 3.3 - Base GPS,  
Fonte: Leica Geosystem



Figura 3.4 - DJI UAV con sistema RTK per un rilevamento accurato

per la rappresentazione del suolo. l'accuratezza dei dati dGPS dipende dal numero e dalla geometria dei satelliti utilizzati per calcolare un punto e dalla modalità di configurazione e rilevamento delle apparecchiature utilizzata. Il geometra scelto per il punto di interesse introduce un fattore di soggettività che dovrebbe basarsi sull'esperienza del tecnico, come nell'indagine TS. Tuttavia, con questa tecnica, è possibile ottenere una precisione inferiore al centimetro, simile alla scansione laser terrestre e più accurata della scansione laser aerotrasportata. Inoltre, la precisione GPS dipende strettamente da fattori ambientali che possono influenzare il segnale satellitare e il collegamento radio tra base e rover. In particolare, per il rilevamento dei ponti, il grande problema consiste nella mancanza di segnale GNSS sotto il ponte, rendendo l'acquisizione complicata o incompleta.

### 3.3 Approccio di rilevamento indiretto

Gli approcci indiretti sono abilitati dal rilevamento digitale remoto che elimina la necessità per un topografo di recarsi fisicamente al punto di interesse target e offre quindi l'opportunità di rilevamento di forme del terreno inaccessibili. Inoltre, l'automazione del rilevamento digitale ha aumentato il tasso di acquisizione dei punti, la copertura spaziale (consentendo la possibilità di riprodurre dati 3d), la riduzione dei tempi di rilevamento, rimosso il giudizio della selezione del punto campione e, soprattutto, spostato l'analisi dal campo all'ambiente digitale, nella fase di post-elaborazione. Va sottolineato che ognuno di questi metodi remoti richiede GCP precisi per georeferenziare l'indagine in coordinate del mondo reale. L'ultimo UAV include gps con sistemi RTK integrati e stazione *base collegata* al fine di ridurre al minimo la necessità di acquisire GCP.

Il rilevamento digitale remoto, che produce tutte nuvole di punti 3D grezzi della scena di destinazione, può essere riassunto in due categorie principali in base alla tecnologia utilizzata: Lidar(Light Detection and Ranging) comunemente noto con il nome dello strumento usato, scanner laser e fotogrammetria digitale e SFM-MVS. L'analisi della fotogrammetria SFM\_MVS indagine specifica per i ponti sarà discussa a fondo nel capitolo 5

#### Lidar (scansione laser terrestre e aerea)

Il processo utilizzato da un Laser scanner per acquisire informazioni spaziali e generare un 3d nuvola punti dell'ambiente si chiama Light Detection and Ranging (LIDAR). Il Laser Scanner emette un impulso laser e registra il tempo necessario affinché quell'impulso ritorni allo scanner, migliaia o diecimila volte al secondo. Il laser viaggia a velocità costante e conoscendo la direzione in cui si trova il laser, la distanza dallo scanner di qualsiasi superficie riflettente e le coordinate remote

della riflessione del punto sono note. Lo strumento può essere utilizzato per il rilevamento aereo, montato su un aeromobile, o per un'indagine terrestre su un treppiede in base all'area da acquisire. Airborne Laser Scanner (ALS) comprende la progettazione di sistemi da montare su aeromobili integrati con Inertial Measurement Unit (IMU) per il posizionamento e la correzione del passo, dell'imbardata e del rotolo dell'aeromobile. L'accuratezza dei dati ALS dipende dal dGPS e dall'unità di misura inerziale e in un ambiente naturale complesso può risultare in una grande superficie di offset verticale. I dati ottenuti dalla SSA si trovano spesso di fronte a errori sistematici nel modello di terreno digitale (DTM) / modello di superficie digitale (DSM). Airborne Laser Scanner è comunemente usato per scansionare grandi aree su scala territoriale, ma a causa della precisione verticale, tra 0,1 m e 0,5 m, non sono adatti per il rilevamento del ponte.

La scansione laser terrestre (TLS), *montata in situ su* treodi di rilevamento convenzionali, comprende un'unità per l'acquisizione laser, un'unità GNSS e IMU per geolocalizzare i dati e un sensore fotografico per registrare il valore RGB (Reed-Green-Blu). TLS è ottimizzato per la precisione in una determinata gamma perché il raggio laser si diffonde con una distanza crescente dallo strumento. L'intervallo di acquisizione può variare dalle indagini interne o a distanza ravvicinata (decine di metri di distanza) alla forma del suolo (chilometri) e, di conseguenza, il laser necessario per raggiungere questa gamma, velocità e precisione del punto può variare notevolmente.

L'acquisizione di LIDAR presenta diversi vantaggi rispetto ad altri metodi di indagine oltre agli ovvi meriti dell'estensione/copertura spaziale e della velocità; i principali vantaggi sono:

1. Indipendenza dall'ora del giorno e copertura del suolo
2. L'impulso laser può penetrare attraverso la vegetazione sparsa (consentendo di determinare simultaneamente sia la vegetazione a otto che l'elevazione "terra nuda", grazie a un algoritmo per la rimozione dei manufatti fatta di viname e attraverso crepe e fessure.
3. Alta precisione e alto livello di dettaglio acquisito.

Dall'altro lato, una grande quantità di dati e dettagli elevati richiedono un'elevata potenza computazionale e tempi di post-elaborazione e possono essere considerati un vincolo se sono necessarie attività di dettaglio rapido e basso. Un altro grande svantaggio è rappresentato dalle esigenze di una posizione di scansione multipla non solo per evitare punti ciechi dietro gli ostacoli, ma anche per ottenere la copertura spaziale richiesta. Inoltre, gli elevati costi hardware (da 30.000 € a 120.000 €) e il peso (minimo 30 kg) e l'acquisizione ad alta intensità di manodopera possono limitare l'estensione e la frequenza delle indagini. Per le indagini sui ponti, l'uso di TLS può essere un'operazione molto complessa a causa della natura dei ponti (i ponti

sono progettati per collegare spazi separati, e per questo motivo spesso sono in alta quota o su un fiume) e dell'inaccessibilità dei luoghi (ad esempio acquisendo dati del ponte del ponte su un fiume presentano diversi problemi e svantaggi pratici). Per questi motivi l'uso per l'ispezione del ponte garantisce un'alta precisione, ma non può essere considerato il metodo migliore.

### 3.4 Fotogrammetria aereo e SFM-MVS per il rilevamento

Come descritto nel capitolo precedente, la mappatura aerea attraverso aerei pilotati è stata la prima applicazione e sviluppo della fotogrammetria. Gli aeromobili consentono, in funzione dell'altezza di volo, la migliore combinazione di copertura spaziale e risoluzione del suolo. L'uso diffuso della fotogrammetria è stato potenziato dall'automazione affidabile del processo fotogrammetrico (ad esempio l'uso di immagini non calibrate che semplificano il processo di acquisizione) e dai progressi tecnologici in informatica, insieme alla disponibilità di elettronica e conseguentemente bassi costi UAV. Come discusso, il processo SFM-MVS, in contrasto con la fotogrammetria tradizionale, consente la ricostruzione della scena 3d utilizzando più immagini (sovrapposte) non calibrate da più punti di vistas. Mentre la fotogrammetria tradizionale richiede un lavoro elevato sulla post-elaborazione relativamente manuale, utilizzando la geometria della scena SFM-MVS, la posizione e l'orientamento della fotocamera vengono recuperati contemporaneamente. Inoltre, questo processo rappresenta il metodo di acquisizione più economico in termini di costo del lavoro e spese in conto capitale. Utilizzando strumenti e tecniche adeguate i risultati forniti in termini di accuratezza possono essere confrontati con i migliori raggiunti con qualsiasi altro metodo di rilevamento topografico, sia diretto che indiretto. La ricostruzione dello spazio 3d in ufficio consente l'analisi post-indagine e l'estrazione di informazioni pertinenti in base al compito necessario.

Le uniche limitazioni sono rappresentate dalla dipendenza dalla condizione di luce ambientale esterna, dall'elevata potenza computazionale necessaria per elaborare i dati, dall'impossibilità effettiva di elaborare dati in tempo reale sul campo per comprendere gli attributi che la nuvola di punti avrà; inoltre, il software utilizzato per l'analisi e l'elaborazione delle nuvole di punti è agli inizi e migliorerà rapidamente nei prossimi anni.

Come discusso, la scelta dello strumento è legata a molteplici fattori quali le condizioni esterne, l'ambiente e la produzione desiderata: nelle due tabelle seguenti viene riassunto un confronto quantitativo tra diversi strumenti (tabelle 1 e 2).

Metodo di indagine	Vantaggi	Svantaggi

Ispezione visiva	Personale tecnico in loco	Dispendiosi in termini di tempo e costi Dipendente dal personale (soggettivo) interruzione del traffico
Stazione totale (TS)	Accurata	Costo elevato La risoluzione potrebbe essere insufficiente per misurare piccole modifiche Errori sistematici su alcune forme del terreno
dGPS	Alta precisione	Costo elevato Alcuni metodi hanno una bassa produttività Necessaria la visibilità di oltre 6 satelliti
Lidar (ALS)	Alta produttività può essere utilizzato durante la notte Area di indagine di difficile accesso Non influenzato dalla copertura vegetale	Costo elevato La risoluzione potrebbe essere insufficiente per misurare piccole modifiche Errori sistematici su alcune forme del terreno
Lidar (TLS)	Alta precisione	Incapace di catturare tutti gli aspetti delle topografie complesse Necessità di posizionamento dell'apparecchiatura
Photogrammetry	Alta produttività Una sola configurazione, nessun operatore richiesto Acquisizione informazioni continue	Bassa risoluzione Le attrezzature devono essere lasciate in posizione per lunghi periodi di tempo (a seconda dell'indagine) Non funziona con nebbia, nebbia e pioggia
SFM_MVS	economico veloce Indipendent del metodo della scala spaziale	Riproducibilità

Table 1 – Vantaggi e svantaggi dei metodi dell'indagine

Survey method	Type	Spatial extent (km)	Spatial Resoution (pt m2)	Data acquisition rate (point/hour)	3d point accuracy (m)
Visual inspection	Direct	0,1	-	-	-
Total Station (TS)	Direct	0,1 - 1	0,1 – 5	Hundreds	<0,01
dGPS	Direct	2,4 – 1	0,1 – 5	Thousands	0,005
Lidar (ALS)	Indirect	5 – 100	0,2 – 10	Milions	0,2
Lidar (TLS)	Indirect	0,01 – 5	100 - 10.000	Milions	0,05
Photogrammetry	Indirect	5,0 – 50	0,5 – 10	Ten of thousands	0,5
SFM_MVS	Indirect	0,01 – 1	1 - 10.000	Milions	0,01 - 0,2

Table 2 – Confronto quantitativo dei metodi d'indagine

### 3.5 I sistemi di monitoraggio

Negli ultimi decenni in monitoraggio nell'ambito dell'ingegneria civile e dell'infrastrutture ha avuto un grande sviluppo includendo costruzioni storiche e nuove, ponti, gallerie, industrie, impianti produttivi, piattaforme offshore, strutture portuali, fondazioni e scavi.

Il monitoraggio strutturale prevede la risoluzione del cosiddetto problema inverso. L'obiettivo principale del monitoraggio è infatti quello di realizzare un modello finale utilizzabile ad esempio per analizzare il comportamento di una costruzione al variare dei carichi applicati.

Riuscire ad approssimare la realtà della configurazione geometrica di un'opera, quasi sempre complessa ed articolata, richiede approfondite competenze e conoscenze tecniche. Il problema principale è riuscire a coniugare le informazioni note a priori (del monitoraggio) con quelle che si ricavano sperimentalmente durante le ispezioni e le prove sui materiali. Il primo modello è costruito sulla base dei disegni di progetto e presenta inevitabilmente degli errori, le cui principali incertezze sono legate ai seguenti parametri:

1. Discretizzazione;
2. Condizioni al contorno;
3. Parametri caratteristici dei materiali;

L'amplificazione dell'errore dovuta a queste incertezze, è valutabile confrontando i valori desunti dalle prove sul campo, con quelli ricavabili dalle previsioni del modello agli elementi finiti. I parametri utilizzati per effettuare il confronto sono sovente quelli legati alle caratteristiche dinamiche della struttura, come le frequenze proprie o le forme modali di vibrazione.

Si rende dunque necessario aggiornare il modello primario sulla base dei dati raccolti durante le prove, in situ ed in laboratorio. Così facendo è possibile ottenere un modello che approssimi più fedelmente la situazione reale. In letteratura sono presenti numerose formulazioni che consentono di tener debitamente conto dei dati sperimentali. Queste procedure, chiamate a scatola nera (black boxes), restituiscono delle modellazioni che si adattano molto bene alle informazioni sperimentali estrapolate sul campo, ma non assicurano una fedele corrispondenza al comportamento reale della struttura.

### 3.6 Il sistema di rilevamento: i sensori

Il sistema di rilevazione sensoriale è il primo e uno dei più importanti elementi costituenti l'architettura del monitoraggio strutturale. Per poter modellare analiticamente e gestire numericamente il comportamento strutturale di un manufatto è necessario effettuare delle rilevazioni. Le rilevazioni hanno il compito di misurare delle grandezze fisiche, che nel caso del monitoraggio strutturale (e per le teorie che verranno riproposte) si traducono principalmente in tre tipologie di parametri:

1. Sorgenti di carico: ambientali (vento, azione sismica) o artificiali (traffico);
2. Risposte strutturali: spostamenti, deformazioni, accelerazioni e inclinazioni;

3. Effetti ambientali: temperatura, precipitazioni atmosferiche, umidità, particelle inquinanti presenti nell'aria;

L'accuratezza e la precisione delle previsioni formulate attraverso il monitoraggio strutturale sono inevitabilmente correlate all'accuratezza e alla precisione degli strumenti di rilevazione. L'importanza che la qualità del dato fornito dalle misurazioni assume è pari a quella dell'intero modello matematico utilizzato nell'elaborazione dei dati. È evidente quindi che strumenti di misura, caratterizzati da elevata accuratezza e precisione nell'acquisizione dei parametri d'interesse, predispongono ad una migliore interpretazione della risposta strutturale. I sensori, che per definizione costituiscono solo una componente dei più complessi trasduttori, traducono una grandezza in ingresso in un'altra grandezza in uscita. Progettare il miglior sistema di monitoraggio per una determinata struttura richiede diversi passaggi. È necessario innanzitutto stabilire quali siano i parametri che si vogliono utilizzare nell'analisi della risposta strutturale. A questa fase segue quella della scelta dei sensori, fatta sulla base della grandezza e della complessità dell'opera da monitorare. Le caratteristiche qualitative intrinseche di ciascun sensore, nonché le differenti tipologie, suggeriscono agli ingegneri quali siano i dispositivi più adatti all'impiego a seconda degli obiettivi che si vogliono raggiungere.

Alla base della conversione della risposta del sistema in segnale elettrico vi sono i trasduttori: sono strumenti che trasformano grandezze come spostamenti, velocità, accelerazioni, tensioni, deformazioni o forme, in segnali elaborati successivamente dal sistema di acquisizione dati. I trasduttori possono essere di diverse tipologie, [24]:

- Analogico: il segnale in uscita è una grandezza elettrica che varia in modo continuo e richiede un convertitore A/D;
- Digitale: il segnale in uscita è composto da uno o più segnali che possono assumere solo due livelli di tensione e la conversione avviene all'interno del sensore;
- Attivo: non ha bisogno di alimentazione per essere prodotto;
- Passivo: al fine di poter funzionare richiede di alimentazione elettrica.

In generale tutti i sensori devono soddisfare le caratteristiche prestazionali come: sensibilità, risoluzione, portata, linearità, isteresi, accuratezza, precisione, isolamento, basso costo e durabilità. Viene di seguito riportata in fig.3.5 una schematizzazione delle prime due tipologie di sensori:

•ANALOG: temporal and spatial continuous		
temperature	Thermocouple, pt100	$\Delta V, \Delta \Omega$
load/force	Load cell	$\Delta \Omega$
strain	Strain gauge, fiber	$\Delta \Omega$
acceleration	Accelerometer	$\Delta Q$
sound	Microphone	$\Delta Q$
displacement	Potenzioni, LVDT, resolver	$\Delta V$
•DIGITAL: temporal discrete		
displacement	Encoder, CCD, Laser	pulse
state	Limit switch	$\Delta V$
frequency	counter	pulse

Figura 3.5 – Schematizzazione tipologie sensori

### 3.7 Carichi naturali e artificiali

Può risultare utile la misurazione dei parametri ambientali di temperatura, umidità, pressione, e radiazione solare. L'intensità di quest'ultima, insieme alla temperatura dell'aria e alle azioni del vento sono gli elementi principali per affrontare lo studio della distribuzione di temperatura all'interno delle strutture.

#### Anemometri e termometri

Gli anemometri misurano la direzione e la velocità del vento, mentre i termometri misurano la temperatura della struttura e quella dell'aria. In strutture particolarmente sviluppate in senso verticale e orizzontale, l'influenza della pressione del vento è notevole, così come lo sono le deformazioni indotte dalle variazioni termiche. (fig. 3.6)



Figura 3.6 - Anemometri

#### Sismometri

I sismometri sono gli strumenti che misurano il moto del terreno. I dispositivi attualmente disponibili sul mercato si differenziano in funzione della lunghezza del periodo di misurazione. Generalmente questi strumenti misurano l'accelerazione attraverso la quale, per integrazione, si possono ottenere velocità e spostamenti. I dati estrapolati dalle misurazioni possono essere usati in fase di progetto o per analisi successive ad un determinato evento sismico.

#### Stazioni Weigh in motion

I dispositivi WIM misurano il peso dei veicoli in movimento, ma anche la loro velocità e la distanza tra gli assi<sup>24</sup>. Sono utilizzabili per quantificare il carico del traffico (traffic load) senza generare lo stop veicolare, aumentando l'efficienza del sistema. Anche per questa tipologia di rilevazioni sono disponibili una vasta gamma di dispositivi, che utilizzano ad esempio strain gauges (estensimetri) o sensori piezoelettrici per effettuare le misurazioni.

#### Stazioni Strain Guages

Sono sensori che consentono la misurazione di deformazioni puntuali di diversi materiali sottoposti all'applicazione di carichi (fig.3.7). Il



principio di funzionamento verte sulla valutazione della variazione di resistenza elettrica della griglia del sensore applicato all'elemento sollecitato indotta dalla deformazione. La risoluzione della misura è molto elevata ed è di circa un micrometro al metro. È possibile, inoltre, individuare sia deformazioni statiche che dinamiche poiché la risposta dell'estensimetro è immediata e sono visualizzabili per mezzo di un sistema di acquisizione connesso ad un computer. A partire dalla conoscenza delle deformazioni rilevate e del modulo di elasticità è possibile determinare tensioni puntuali. Le tipologie di sensori maggiormente utilizzati sono: strain gauges a resistenza elettrica e strain gauges a corde vibranti.

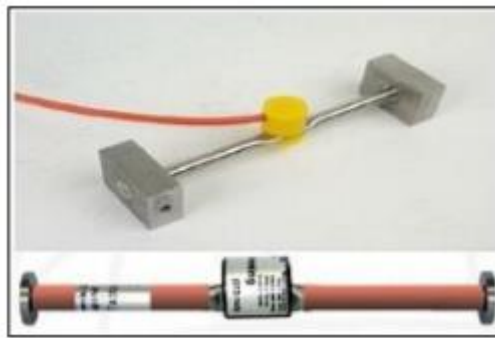


Figura 3.7- Stazioni strain Guages

### Celle di Carico

Vengono utilizzate nel monitoraggio dei tiranti, della catene, delle chiodature, delle bullonature, dei diaframmi, dei muri di contenimento, di carichi applicati all'esterno vincolati ad un elemento trave o sulla testa di un palo. Le tipologie di questi sensori si contraddistinguono in funzione del segnale in uscita generato (pneumatico, idraulico o elettrico) e in base alla modalità di rilevamento del peso (flessione, taglio, compressione e trazione) (Fig. 3.8)



Figura 3.8 – Celle di Carico

## 3.8 Risposta strutturale

### Estensimetri

L'estensimetro (in inglese, strain gauge) è lo strumento utilizzato per misurare la deformazione, intesa come la variazione di lunghezza nell'intorno di un punto, di un elemento tridimensionale.

Si riporta un elenco dei principali estensimetri utilizzati fino ad oggi, e una sommaria descrizione:

- estensimetro induttivo: utilizza un trasduttore di spostamenti induttivo per leggere i piccoli spostamenti;
- estensimetro capacitivo: la variazione della distanza tra le armature attive di un condensatore viene tradotta in deformazione;
- estensimetro a filo vibrante: la variazione di lunghezza di un filo teso alle due estremità si traduce in una variazione della tensione a cui è soggetto e questa è responsabile della variazione delle frequenze proprie di vibrazione;
- estensimetro ottico: un sistema di prismi e specchi proietta un raggio luminoso con angolazione variabile all'aumentare della deformazione registrata;
- estensimetro ottico laser: utilizza i principi dell'interferometria ottica;
- estensimetro resistivo: uno dei più comuni, La deformazione elastica viene calcolata attraverso la variazione della resistenza elettrica dello strumento, misurata in Ohm. La lunghezza dello strumento varia da pochi millimetri a pochi centimetri.
- estensimetro a fibre ottiche: uno dei sistemi più utilizzati negli ultimi anni, il principio di funzionamento sfrutta la variazione delle caratteristiche dell'onda luminosa per l'acquisizione del dato. I sensori modificano una fibra in modo che la grandezza d'interesse moduli la fase, la lunghezza d'onda o la polarizzazione della luce.



Figura 3.9 - Estensimetri

### Inclinometri

Gli inclinometri sono strumenti che consentono di misurare il grado di inclinazione. Nell'ingegneria civile restituiscono il valore della variazione angolare tra la posizione iniziale e finale dell'elemento su cui è stato installato il sensore. Le tecniche di misurazione dell'inclinazione variano ampiamente, dai goniometri meccanici a

pendolo e dai livelli a bolla fino ai trasduttori interferometrici ottici e ai sensori elettrolitici. Questi ultimi, tra i più diffusi, sono anche quelli più sensibili alle interferenze elettromagnetiche. È stato questo uno dei motivi per cui le fibre ottiche hanno riscontrato grande successo tra i sensori di misurazione: la loro “immunità” ai campi elettromagnetici.

#### **Sonde inclinometriche da foro**

Progettati per il controllo delle deformazioni orizzontali di corpi franosi, strutture di sostegno e rilevati, si tratta di sensori capaci di misurare la rotazione essendo posizionati all'interno di tubi verticali cementati nel terreno. La lunghezza dei tubi è variabile in funzione del terreno interessato e del tipo di applicazione; è formato, inoltre, da quattro scanalature per permettere lo scorrimento delle rotelle retrattili della sonda. La determinazione degli spostamenti avviene mediante la valutazione della deformazione del tubo quantificabile tramite algoritmi che prevedono come dato di input la rotazione. Quest'ultima è fornita dai trasduttori di rotazione installati all'interno del tubo il cui numero può essere scelto tramite un moderno software ECLIPSE che permette di ottenere, anche con pochi punti, l'andamento della deformata del tubo. Il principio di funzionamento si basa sulla coerenza di deformazione tra il tubo e il calcestruzzo/terreno/struttura adiacente. Tale tipologia di sensori si contraddistingue per la facilità di montaggio, l'elevato dettaglio di misura, l'esecuzione di misure in automatico con possibilità di telecontrollo da postazioni remote, l'elevata affidabilità nel tempo e l'ottimo rapporto qualità/prezzo. Inoltre, si possono utilizzare diverse tipologie di sensori inclinometri: elettrolitici, capacitivi, magnetoresistivi e servoaccelerometrici (fig.3.10). A seconda della tipologie di sensore utilizzato le caratteristiche tecniche di misura variano: ad esempio nel caso elettrolitico il campo di misura è di  $\pm 5^\circ/10^\circ/30^\circ$ , la risoluzione pari a  $0,005^\circ$  e la sensibilità di  $1,3 \pm 0,3\% V_{in}/1^\circ$



**Figura 3.10** – Sonda inclinometrica da foro

#### **Inclinometri da Parete**

Sono dispositivi che consentono la misura della variazione di inclinazione di pareti o superfici appartenenti a strutture civili e



industriali, opere di contenimento, di edifici monumentali o pareti rocciose. Grazie all'acquisizione automatica dei dati permettono il monitoraggio continuo anche per punti non facilmente raggiungibili. Questi sensori sono costituiti da un corpo in acciaio inossidabile o alluminio anticorrosione contenente sensori e mensole o piastre di posizionamento e fissaggio. I segnali in uscita dai sensori sono proporzionali all'angolo tra lo strumento e la verticale, con riferimento ai piani di sensibilità dei sensori. È inoltre, possibile valutare la rotazione lungo uno o due assi (monoassiali o biassiali) nel piano ortogonale l'asse verticale. La trasmissione del segnale, sottoforma di input elettrico, avviene per mezzo di un cavo esterno. A seconda del sensore utilizzato, gli inclinometri si differenziano in: capacitivo, magnetoresistivo, elettrolitico e servoaccelerometrico (fig.3.11). Il modello elettrolitico si compone di un sensore contenente un liquido elettrolita che in funzione dell'inclinazione bagna una serie di elettrodi facendo variare la resistenza elettrica che viene convertita in un segnale di tensione. Per questa tipologia di sensore si possono definire le seguenti caratteristiche tecniche: campi di misura pari a  $\pm 2^\circ/5^\circ/10^\circ/30^\circ$  e una precisione di  $0.01^\circ$ .

Figura 3.11 – Inclinometro da parete

#### **LVDT: Linear Variable Differential Transformer**

L'LVDT è uno dei più comuni dispositivi utilizzati nel settore edile per la misurazione di spostamenti relativi. Il suo principio di funzionamento è quello di mutua induttanza. Un tubo metallico cavo contiene delle bobine al suo interno e un nucleo ferromagnetico. Le bobine producono

un segnale elettrico in funzione della posizione del nucleo mobile all'interno.

### Pendoli

Sono utilizzati per misurare in modo accurato le rotazioni di strutture quali dighe, ponti, viadotti e edifici con una significativa altezza. Si suddividono in due categorie: dritti e rovesci. Il principio di funzionamento per entrambe le tipologie è il medesimo ed è quello del filo di piombo: un filo, zavorrato ad una estremità funge da verticale di riferimento per effetto della gravità e la misurazione verte nel registrare gli spostamenti di uno o più punti appartenenti al piano perpendicolare alla verticale gravitazionale. Nel caso del pendolo rovescio il filo è ancorato in basso, mentre all'estremità opposta al filo è collegato un galleggiante, sito in una vasca, che lo mantiene in perfetta posizione verticale. Le principali caratteristiche tecniche di tali strumenti sono:



Figura 3.12 - Pendolo

### Bibliografia

- Achour N., Miyajima M., Ikemoto T., Ingaki J. (2005). Damage analysis of health care facilities in the 2004 Niigata-Ken Chuetsu earthquake, *Journal of Earthquake Engineering* 28, Paper 164, 7 pp..
- Aktan A.E., Ciloglu S.K., Grimmelman K.A., Pan Q., Catbas F.N. (2005). Opportunities and challenges in health monitoring of constructed systems by modal analysis. *Atti della International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, Bordeaux, Francia.
- Barthorpe R., (2011). On model - and data-based approaches to structural health monitoring. Tesi di dottorato, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield.
- Cawley P. & Adams R. (1979). The locations of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 224(2), 359-374.
- Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., Shevitz, D.W. (2006). Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. Technical Report LA-13070-MS, UC-900, Los Alamos National Laboratory, New Mexico 87545, USA.

- Farrar C.R. & Worden K., (2013). Structural Health Monitoring - a machine learning perspective. Jhon Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- FEMA (2012). Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide, FEMA E-74, Fourth Edition, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- Fierro E. A., Miranda E., Perry C.L. (2011). Behavior of Nonstructural Components in Recent Earthquakes. Architectural Engineering Conference (AEI).
- Friswell M.I. & Mottershead J.E. (1995). Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Peeters B. (2000). System identification and damage detection in civil engineering. Tesi di dottorato, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgio.
- Peeters B., Van der Auweraer H., Guillaume P., Leuridan J. (2004). The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?. Shock and Vibration, 11: 395-409.
- Rainieri C., Fabbrocino G., Cosenza E. (2011). Near real-time tracking of dynamic properties for standalone structural health monitoring systems. Mechanical System Signal Processing. 25: 3010-3026.
- Rainieri C. & Fabbrocino G. (2010). Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures. Mechanical System Signal Processing. 24: 678-695







#### **4. Il metodo sperimentale di indagine proposto per il monitoraggio di infrastrutture: il sistema previsionale e l'early warning**

Fino ad oggi (facendo riferimento ai sistemi di monitoraggio tradizionali) in fase di progettazione delle infrastrutture si evidenziava una generale tendenza ad “economizzare” le risorse destinate alle stesse con particolare riferimento ai sistemi di monitoraggio. Tale modus operandi non considerava l'installazione dei sistemi di monitoraggio e controllo come parte integrante dell'infrastruttura stessa, non tenendo per nulla in considerazione che i costi di post-intervento necessari per il monitoraggio e controllo della infrastruttura nel tempo soprattutto nel caso in cui la stessa presenti criticità, risultano molto più elevati rispetto ai potenziali “risparmi” che si otterrebbero invece adottando preventivamente una metodologia (sistemi di monitoraggio innovativi) in grado di valutare il comportamento delle infrastrutture nel tempo (monitoraggio in continuo).

Ancora oggi, nonostante i continui eventi di cronaca inerenti le drammatiche notizie di crolli di ponti e viadotti, i sistemi di monitoraggio tradizionali sono percepiti come un onere per l'istituzione o ente gestore, non presentando effettivamente una convenienza economica a fronte della spesa di installazione.

Infatti, ad oggi l'uso di questi sistemi comporta che:

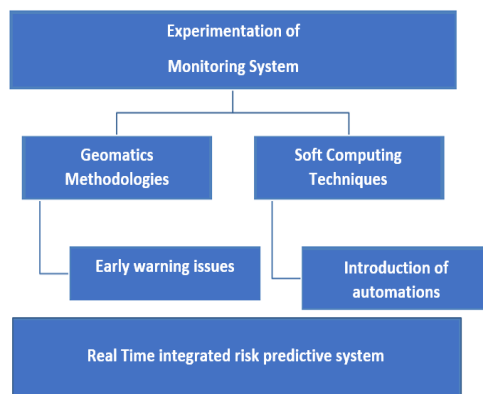
- I dati vengono acquisiti dalla strumentazione e archiviati;
- le grandezze acquisite vengono verificate e che rientrino nei valori di soglia impostati;
- Il report di monitoraggio è limitato ai valori che le grandezze fisiche hanno avuto nel tempo;
- L'interpretazione dei dati è data a consulenze specialistiche;
- Non ci sono informazioni sulla coerenza tra comportamento atteso e misurato della struttura;
- A seguito di eventi eccezionali, è necessaria la consulenza di uno specialista per capire se il comportamento resistente dell'infrastruttura è cambiato in modo significativo.

Diverse sono le considerazioni da farsi in relazione alla possibilità di utilizzo di sistemi di monitoraggio innovativi anche in fase di progettazione tenendo conto dei benefici che essi apportano sia in termini economici che di prevenzione del rischio.

In questo contesto, le attività che si sono portate avanti nella presente tesi tentano quindi di superare i limiti derivanti dall'utilizzo di sistemi di monitoraggio tradizionali, presentando, implementando e sperimentando una metodologia che integra tecniche di Geomatiche e di Soft Computing al fine di produrre un sistema da un lato finalizzato a risolvere problematiche di early warning, e dall'altro a generare un sistema previsionale sfruttando principalmente parametri geomatici.

La metodologia proposta riguarda dunque la progettazione e successiva realizzazione di un sistema integrato hardware/software per monitorare il territorio e il costruito, che integra metodologie geomatiche con quelle della soft computing (al fine di introdurre automazioni nella raccolta, nell'elaborazione, previsione e trasmissione dei dati) finalizzato da un lato all'Early warning e dall'altro alla realizzazione di un sistema previsionale sul comportamento dell'infrastruttura.

Più nel dettaglio, si è voluto finalizzare l'uso delle tecnologie geomatiche (integrate anche dall'utilizzo di sensori in loco) a problematiche di Early Warning, e dall'altro attraverso tecniche di soft computing produrre un prototipo utile per il monitoraggio delle infrastrutture attraverso un sistema previsionale. (fig, 4.1).



**Figura 4.1** - Schema unità centrale sistema

Il fine ultimo, dunque, è stato quello di creare un sistema predittivo del rischio in tempo reale che simulando diversi scenari e, quindi, vari comportamenti delle infrastrutture oggetto di indagine, è in grado di allertare i soggetti preposti, in caso di pericoli imminenti.

Il sistema proposto utilizza dati di diversa natura (anche in fase preventiva per definire i vari scenari di comportamento dell'infrastruttura sul modello strutturale), rielaborandoli poi attraverso tecniche di machine learning, al fine di ottenere valori previsionali da confrontare con soglie limite rappresentanti differenti livelli di rischio.

L'architettura del sistema (riportata e schematizzata nel flow chart di figura 4.2.) consta (prescindendo dai dati iniziali utili per definire i vari scenari di comportamento della infrastruttura e costituiti nella presente sperimentazione da: carichi agenti sull'infrastruttura sia artificiali – traffico giornaliero medio - che naturali – vento, eventuali portate d'acqua agenti sulle pile, capacità del terreno) di:

- un sistema di acquisizione dati (Sistemi uav - Sistemi GNSS – Sensori accelerometrici)
- Un Sistema per la Modellazione Strutturale
- un sistema di Soft Computing che utilizza una idonea rete neurale sia in fase di addestramento (utilizzando i diversi scenari di comportamento della infrastruttura) che in fase previsionale (richiedendo in fase di input una volta addestrata la rete esclusivamente dati di spostamento (statici e dinamici), per produrre i livelli di rischio.
- un Sistema di trasmissione dati.
- un Sistema di elaborazione e visualizzazione dei risultati

I risultati del sistema e dunque le eventuali segnalazioni di criticità sono ottenuti attraverso l'analisi e la simulazione di eventuali scenari futuri su di un modello strutturale "finale" costruito dalla integrazione di più modelli rappresentativi dell'oggetto di studio (infrastruttura):

- un modello 3D rilevato da drone (utile per avere a disposizione lo stato di fatto iniziale e le informazioni di tipo geometrico della struttura da monitorare),
- un modello strutturale all'istante "0" sul quale vengono variate più condizioni al contorno per simulare altrettanti scenari (scenario n).

Il modello finale così ottenuto viene integrato con i dati acquisiti in real-time dal sistema di sensori (spostamenti).

I dati vengono dunque elaborati attraverso un sistema di reti neurali che permettono di restituire il comportamento previsionale nel tempo della infrastruttura a fronte degli spostamenti rilevati.

In particolare viene utilizzata una rete neurale (basata sull'algoritmo back propagation) a 3 strati con due livelli di input (spostamenti, carichi), due livelli nascosti e un livello di output. Il numero di nodi nel livello di input è determinato dalla dimensionalità dei dati, mentre il numero di nodi nel livello di output è determinato dal numero di classi di rischio (preventivamente definite). Tali dati vengono poi trasmessi con chiavetta internet key 4G LTE ad una idonea piattaforma di monitoraggio opportunamente realizzata.

Il valore del sistema proposto sta nella possibilità di valutare e determinare, per ogni elemento strutturale (travi, campati, pile, basi) caratterizzante l'infrastruttura sotto indagine, utilizzando tecniche di soft computing, una "classe di rischio" specifica predicendo quindi il comportamento della struttura ed utilizzando solo dati di spostamento e non tutta una serie di parametri che invece vengono utilizzati solo inizialmente per la fase di addestramento della rete neurale.

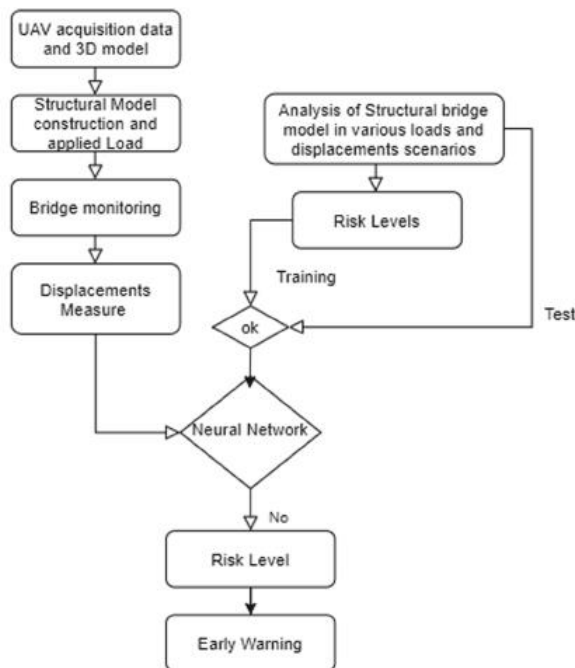


Figure 4.1 – Schema unità centrale sistema

Tutto il prototipo è dunque basato su di una centralina, installata nelle prossimità del viadotto (fig. 5.3) che raccoglie i dati dei vari sensori li invia ad una piattaforma di elaborazione dati (server centrale posto all'interno dei locali del laboratorio di Geomatica del Diceam dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria) dove è implementato tutto il sistema che può essere gestito da un operatore in grado di visualizzare i dati di output sia in relazione alla fase di Early Warning che a quella previsionale sul comportamento della infrastruttura nel tempo.

Una volta presentata la metodologia nel suo complesso, si presentano più nel dettaglio le varie fasi del lavoro che consistono in:

- Acquisizione dati da sensori (vedi capitolo 3)
- Acquisizione dati GPS con sistemi low cost
- Considerazioni sull'eventuale uso del Sensore di spostamenti veloci Vadase
- Trasmissione dati da sensori a sistema di elaborazione dati
- Rilievo da drone per la modellazione tridimensionale della infrastruttura ed estrazione automatica delle caratteristiche geometriche (vedi capitolo 2)
- Costruzione del modello strutturale finale: integrazione del modello strutturale con la geometria estratta dal modello 3D e con i dati di "carico" acquisiti

- prevalentemente da sensori per il calcolo del comportamento strutturale dell'infrastruttura
- Applicazione tecniche soft computing per la stima e predizione del comportamento strutturale dell'infrastruttura
- Visualizzazione su piattaforma di Early Warning e del comportamento predittivo della struttura

La piattaforma di visualizzazione è stata implementata in ambiente WordPress® valutato che la piattaforma selezionata è in grado di:

- offrire più di 10.000 temi disponibili, più di 20.000 plugins / moduli disponibili
- è utilizzata da milioni di persone e siti web in tutto il mondo
- è la piattaforma di blogging più grande al mondo risultando e semplice da integrare con altri pacchetti software, e con i profili social networking,
- rende possibile gestire siti web multipli in un unico dashboard.

Al contempo, al fine di prevenire gli svantaggi insiti nella programmazione in WordPress®, si sono integrati protocolli di sicurezza SSL, (che fornisce un livello fondamentale di sicurezza online, essenziale quando si trasmettono informazioni sensibili). Infatti in un ambiente imprevedibile, dove gli strumenti per la sicurezza delle reti vengono puntualmente compromessi dagli hacker, il protocollo di sicurezza SSL garantisce la riservatezza e l'integrità dei dati inviati tramite Internet.

#### 4.1. Acquisizione dati da sensori

Il sistema integrato acquisisce i dati da una serie di sensori opportunamente installati sull'infrastruttura sotto indagine (si rimanda al capitolo 3 per una dettagliata spiegazione dei sensori utilizzati)

Nella fase preliminare relativa alla definizione dei “carichi” dell'infrastruttura, nella presente sperimentazione sono stati utilizzati sensori Wisensing (Datasheet v 2.0) (che integrano al loro interno:

- Sensori di temperatura e umidità: installati rispettivamente per monitorare gradienti di temperatura e d'umidità. Essi sono anche utili per verificare se le grandezze in gioco sono correlate con parametri ambientali, con una sensibilità di 0,5 ° C
- Accelerometri: per acquisire vibrazioni in termini di storie accelerometriche su 3 assi.
- Inclinatori: utilizzati per valutare rotazioni della struttura, e misurare le inclinazioni degli angoli polari delle sezioni cui sono applicati, con sensibilità di 0,02 °

In figura 4.3 si riportano le specifiche dei sensori utilizzati

Sensors specification	
<b>Accelerometer for SHM</b>	
Accelerometer Technology	Low power MEMS technology
Scalable measurement range	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$
Measurement resolution	3.9 $\mu g/\text{digit}$ @ $\pm 2g$ , 7.8 $\mu g/\text{digit}$ @ $\pm 4g$ , 15.6 $\mu g/\text{digit}$ @ $\pm 8g$
Typical non-linearity	$\pm 0.1\%$ FS
Sensitivity change Vs temperature	$\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ (-40°C to +125°C)
Zero-g level change vs temperature	$\pm 0.02 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$ (-40°C to +125°C)
Typical zero-g level offset accuracy	$\pm 25 \text{ mg}$
Noise spectral density @ BW 500Hz	25 $\mu g/\sqrt{\text{Hz}}$
<b>Accelerometer for Shock</b>	
Accelerometer Technology	Low power MEMS technology
Scalable measurement range	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$
Measurement resolution	1 $\text{mg}/\text{digit}$ @ $\pm 2g$ , 2 $\text{mg}/\text{digit}$ @ $\pm 4g$ , 4 $\text{mg}/\text{digit}$ @ $\pm 8g$
Typical non-linearity	$\pm 0.5\%$ FS
Sensitivity change Vs temperature	$\pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$ (-40°C to +85°C)
Zero-g level change vs temperature	$\pm 0.5 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$ (-40°C to +85°C)
Typical zero-g level offset accuracy	$\pm 50 \text{ mg}$ (Z axis) $\pm 35 \text{ mg}$ (X,Y axes)
Noise spectral density @ BW 100Hz	920 $\mu g/\sqrt{\text{Hz}}$
<b>Temperature</b>	
Measurement range	from -40°C to +125°C
Accuracy	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

Figura 4.3 – Schema unità centrale sistema

#### 4.2. Acquisizione dati GPS con sistemi low cost e correzione errori

Relativamente all'utilizzo di sensori necessari per la determinazione dei valori di spostamento (utili sia per l'early warning che per la fase previsionale), preventivamente alla descrizione della tipologia di sensori (Ricevitori) GNSS utilizzati nella presente tesi e' necessario effettuare alcune considerazioni preliminari

Tra le diverse tecniche che possono essere utilizzate per applicazioni di monitoraggio la tecnologia GNSS offre attualmente un'ampia scelta di soluzioni. Come noto le migliori prestazioni si ottengono utilizzando il ricevitore di classe geodetica a doppia frequenza, in grado di mantenere elevate precisioni anche per il monitoraggio su larga scala, e di raggiungere precisioni anche sub centimetriche quando si considerano intervalli di tempo di osservazione molto lunghi. Nonostante il costo degli strumenti sia in diminuzione, queste strumentazioni sono ancora piuttosto costose, se paragonate ad altri sensori utilizzati per l'ingegneria strutturale, come inclinometri ed estensimetri.

Tuttavia, negli ultimi anni si sta diffondendo l'utilizzo di ricevitori GNSS a singola frequenza diventando sempre più presenti sul mercato grazie al loro basso costo e alle elevate prestazioni confrontabili con quelli di ricevitori a doppia frequenza (nel caso di posizionamento differenziale lavorando con basi corte).

Al fine preventivo di verificare la bontà dei risultati (in termini di precisione e ripetibilità) ottenuti con ricevitori a singola frequenza, e con ricevitori sperimentali (VADASE), è stata condotta una sperimentazione confrontando i risultati ottenuti dalle precedenti strumentazioni/metodologie con quelli derivanti da ricevitori di classe geodetica a doppia frequenza (utilizzati in modalità statica/relativa) ormai collaudati e di sicura affidabilità.

Più in dettaglio, sono stati utilizzati:

- un ricevitore LEICA-GMX30 (Firmware VADASE) con antenna (codice e fase L1 / L2 a 24 canali, velocità dati 20 Hz, tecnologia Smart Track per elevata precisione, precisione di  $1 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$  (orizz.),  $2 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  (ver. ))
- Una rete di 9 sensori GNSS (utilizzati soprattutto per monitorare i cedimenti e gli spostamenti dei giunti) composta da sensori GNSS low cost (costituiti da coppie di ricevitori a singola frequenza, u-blox C94-M8P, associati ad un'antenna Trimble bullet 360) e ad un ricevitore di classe geodetica a doppia frequenza il Leica GM30 GNSS;
- Due ricevitori GPS Leica-1250 (codice e fase L1 / L2 a 16 canali, velocità dati 20 Hz, tecnologia Smart Track, precisione di  $1 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$  (orizz.),  $2 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  (ver. )) utilizzati in modalità prevalentemente statica relativa e con una stazione totale serie Flexline modello TS02-7"

In relazione all'utilizzo dei ricevitori a singola frequenza nella presente ricerca è stata utilizzata una metodologia per la ricostruzione di un'osservazione sintetica L2 per ricevitori GNSS low cost (posizionati in modo che la distanza reciproca nelle tre coordinate sia nota) a partire dalle osservazioni acquisite da un unico ricevitore di classe geodetica posizionato nelle vicinanze.

Questa metodologia utilizzata (metodologia differenziale per ricevitori a singola frequenza) risolve la problematica che hanno le tecniche di posizionamento differenziale a singola frequenza per applicazione di Precise Point Position (PPP).

Come noto, PPP nasce come una tecnica di post-processing dei dati GNSS che combinando le osservazioni di codice e di fase permette di ottenere posizionamento con accuratezza centimetrica in scenari statici. Non trattandosi di una tecnica di posizionamento differenziale tali livelli di accuratezza possono essere raggiunti solamente utilizzando prodotti affidabili per correggere i principali errori che riguardano il

posizionamento come la posizione dei satelliti, offset dell'orologio satellitare o dei centri di fase delle antenne e fenomeni periodici di marea terrestre. Lo studio di tecniche di Real Time PPP, ostacolato dalla disponibilità di queste correzioni, con un ritardo che dipende dal tipo di correzione (ultrarapida, rapida o precisa), è argomento discusso all'interno della comunità scientifica con lo sviluppo di diversi metodi che permettano l'applicazione della tecnica in tempo reale. Il principale ostacolo al raggiungimento di accuratezza centimetrica è rappresentato tuttavia dalla presenza dell'atmosfera: troposfera e ionosfera introducono infatti errori variabili tra metri e decine di metri che devono opportunamente essere modellati. Il disturbo troposferico, viene tipicamente stimato all'interno di algoritmi PPP per incrementare l'accuratezza del posizionamento.

Più complicata risulta invece la soluzione del problema causato dalla ionosfera (mezzo dispersivo in banda L, che induce effetti differenti su osservazioni acquisite sulle diverse frequenze).

La combinazione lineare ionosphere-free permette, utilizzando ricevitori a doppia frequenza, di eliminare il disturbo ionosferico fino al secondo ordine. L'impossibilità di applicare tale combinazione a dati acquisiti da ricevitori a singola frequenza impedisce il raggiungimento di elevati livelli di accuratezza.

Esistono in bibliografia diverse soluzioni per risolvere il problema (applicando il modello di Klobuchar, utilizzando le Global Ionosphere Maps, attraverso la costruzione di una nuova osservazione dalla combinazione di Codice e Fase GRAPHIC – Group and Phase Ionospheric Combination).

Nella presente tesi, è stata applicata una nuova metodologia che ricostruisce un'osservazione sintetica L2.

È stata dunque utilizzata una metodologia per l'acquisizione delle osservabili per la ricostruzione di un'osservazione sintetica di fase L2 per ricevitori GNSS low cost (posizionati in modo che le distanze reciproche nelle tre coordinate sia nota) a partire dalle osservazioni acquisite da un unico ricevitore di classe geodetica posizionato nelle vicinanze. L'algoritmo calcola la variazione temporale, epoca dopo epoca, del ritardo ionosferico per ogni satellite che il ricevitore di classe geodetica di riferimento, è in grado di ricevere, applicando la combinazione lineare geometry-free alle sue osservazioni di fase (L1L2).

L'equazione di osservazione di fase per la frequenza  $i$ , ricevitore  $R$  e satellite  $S$  può essere espressa come segue:

$$Li_{RS} = \rho R^S + c(dt_R - dt^S) - li_{RS} + T_{RS} + \lambda i Ni_{RS}$$

Dove i termini rappresentano, rispettivamente

- la distanza geometrica Ricevitore satellite,



- la differenza tra gli offset degli orologi ricevitore satellite,
- il ritardo ionosferico, il ritardo troposferico, e la lunghezza d'onda moltiplicata per l'ambiguità iniziale di fase.

Omettendo gli indici per il ricevitore e per il satellite, è possibile ricostruire il ritardo ionosferico  $I1$  in assenza di cycle slip:

$$L1 - L2 = -I1 + I2 = -I1 + I1 \frac{f_1^2}{f_2^2}$$

(Nella relazione si è indicato con  $f_i$  la frequenza del segnale).

L'errore ionosferico  $I1$  può essere ricavato tramite un'adeguata modellazione dello strato ionosferico. Utilizzando il modello single layer model (in cui la ionosfera viene assimilata ad un unico strato di spessore infinitesimale, posta a una quota media di 350 km dalla superficie terrestre), associato all'utilizzo di una mapping function (MF) (che permette di mappare in direzione zenitale ( $Iz1$ ) l'errore ionosferico  $I1$ , calcolato sulla linea di segnale), si assume che una distribuzione del campo di elettroni liberi storicamente simmetrica nella regione di sopra della stazione GNSS considerata, permette di relazionare  $I1$  e  $Iz1$  per tutti i satelliti in vista del ricevitore di classe geodetica e per ogni sensore come segue :

$$Iz1 = I1 \cos Z'$$

Combinando le due equazioni si ottiene la formulazione per  $Iz1$ :

$$Iz1 = \frac{L1 - L2}{\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}} \cos Z'$$

Pertanto, considerando due epoche consecutive, è possibile ottenere la variazione nel tempo del ritardo ionosferico in direzione zenitale  $\delta Iz1$ :

$$I1^* = \frac{Iz1}{\cos Z'} = \frac{L1 - L2}{\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}} \frac{\cos Z'}{\cos Z'^*}$$

L'utilizzo della mapping function, infatti, permette di considerare il differente percorso del segnale che viaggia da uno stesso satellite a due ricevitori differenti e svolge un ruolo cruciale nell'accuratezza della ricostruzione ionosferica eseguita. Per quanto detto è possibile costruire la variazione temporale dell'osservazione sintetica  $I2^*$  per tutti i satelliti in vista contemporaneamente dai due ricevitori:

$$\delta L2^* = \delta L1^* \delta(L1 - L2) \frac{\cos Z'}{\cos Z'^*}$$

Il termine  $\frac{\cos Z'}{\cos Z'^*}$  può essere ricavato a partire da considerazioni trigonometriche

$$\cos Z' = \sqrt{1 - \left( \frac{|\vec{R}| \cos e}{|\vec{R}| + H_I} \right)^2}$$

$$\cos Z'^* = \sqrt{1 - \left( \frac{|\vec{R} + \Delta\vec{R}| \cos (e + \Delta e)}{|\vec{R}| + H_I} \right)^2}$$

Dove

- $|\vec{R}|$  rappresenta il raggio della Terra
- $H_I$  l'altezza dello strato ionosferico al di sopra della superficie terrestre e l'elevazione del satellite S rispetto al ricevitore GNSS a doppia frequenza R,
- $(e + \Delta e)$  l'elevazione del satellite S rispetto al ricevitore GNSS a singola frequenza R'
- $\Delta\vec{R}$  la distanza tra i ricevitori

E' bene sottolineare che la medesima strategia può essere utilizzata per ottenere un'osservazione di codice sintetica sulla frequenza L2 necessaria nel caso dell'utilizzo di tecnica PPP o di alternative metodologie basate sulle osservazioni di pseudo-range.

#### 4.3. Considerazioni sull'eventuale uso del Sensore di spostamenti veloci Vadase

Alternativa sicuramente più interessante nella misurazione di spostamenti veloci è di certo il sistema VADASE (Velocity and Displacement Autonomous Solution Engine) particolarmente utile per l'early warning.

Il VADASE è un software installato a bordo di stazioni di riferimento e ricevitori GNSS per il monitoraggio, brevettato dal Prof. Mattia Giovanni Crespi, dell'Area di Geodesia e Geomatica del Dipartimento DICEA, e distribuito da Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Svizzera), multinazionale leader nella strumentazione e software in ambito geomatico.

Come noto, mentre gli spostamenti lenti di pochi millimetri possono essere individuati con l'elaborazione di numerose ore o giornate di misure GNSS di alta precisione, i movimenti veloci necessitano una loro valutazione immediata, le velocità devono essere monitorate in continuo e i risultati devono essere disponibili in tempo reale.

L'integrazione, dunque, del software VADASE nei ricevitori permette di spostare l'attenzione dagli spostamenti statici a spostamenti di tipo dinamico.

Il sistema è composto da un singolo ricevitore autonomo, in grado di rilevare in tempo reale rapidi movimenti di strutture naturali o artificiali. Utilizzando algoritmi di processamento in tempo reale ad alta frequenza, Leica VADASE fornisce con dettaglio informazioni su movimenti rapidi e spostamenti, costituendo una completa, precisa ed affidabile soluzione di monitoraggio in tempo reale ed autonoma.

Il sistema è concepito per fornire risultati in maniera completamente indipendente da qualunque servizio di correzione RTK in tempo reale. Ogni spostamento rilevato viene memorizzato a bordo del singolo ricevitore e viene notificato via mail. È quindi possibile fornire istantaneamente al professionista un dato relativo agli spostamenti strutturali rilevati, per poter prendere le necessarie decisioni per mitigare danni alle strutture e potenzialmente salvare vite.

Il sistema rappresenta un valore aggiunto al tradizionale monitoraggio con tecnologie GNSS, fornendo accurate misure di velocità continuamente disponibili in tempo reale per una precisa ed affidabile analisi di movimenti veloci.

Differentemente dai tradizionali sistemi di monitoraggio GNSS che richiedono hardware aggiuntivo o infrastrutture per la correzione differenziale (come una o più stazioni di riferimento o servizi globali per il posizionamento di precisione), Leica VADASE elabora i dati in autonomia senza necessità di servizi o strumenti aggiuntivi.

Il sistema così integrato permette di determinare in maniera accurata spostamenti cosismici e forme d'onda in tempo reale, utilizzando i prodotti (orbite e orologi) usualmente trasmessi dai satelliti nel messaggio navigazionale e le osservazioni di fase acquisite con continuità ad alta frequenza di campionamento (uguale o maggiore di 1 Hz) da un unico ricevitore GPS.

Con tale configurazione, in caso di spostamenti veloci, le forme d'onda si renderebbero disponibili in tempo reale con accuratezza a livello centimetrico e potrebbero essere trasmesse istantaneamente ad un centro di controllo remoto, cui spetterebbe quindi la decisione di diramare l'allarme.

#### **4.4. Trasmissione dati da sensori a sistema di elaborazione**

In relazione alla trasmissione dei dati di spostamento rilevati dai sensori installati sull'infrastruttura, bisogna distinguere tra ricevitori GNSS low cost e ricevitori che usano il sistema VADASE

Nel particolare e' bene osservare che i dati inviati dal sistema VADASE vengono trasmessi da un semplice sistema di trasmissione dati,essendo il ricevitore di per se dotato di un software integrato per la registrazione dei dati (data logging) e un sistema di invio FTP push.—Ogni spostamento rilevato con i sensori Vadase viene dunque memorizzato a bordo del singolo ricevitore e viene notificato via mail.

Differente invece risulta la modalita' di trasmissione dati per i sensori a singola frequenza; per questi sensori infatti e' prevista una trasmissione attraverso un modulo radio per la comunicazione tra master e Rover; il sistema di trasmissione (relativamente alla sperimentazione portata avanti nella presente tesi) dati è stato realizzato mediante l'accoppiamento di un Raspberry pi 3 ed usb-dongle 4G. Inoltre, è stato inserito un hard disk esterno per consentire la memorizzazione locale dei dati grezzi per scopi di backup.

Per ottenere la trasmissione dei dati acquisiti dai sensori lowcost è stata effettuata dunque una progettazione in ambiente EasyEDA®. La scheda è stata adeguatamente progettata e integrata con i componenti necessari per l'elaborazione dei dati. I dati rilevati in tempo reale sono stati trasmessi con chiave internet 4G LTE ad una piattaforma di monitoraggio. Il sistema di trasmissione dati è stato realizzato mediante l'accoppiamento di un Raspberry pi 3 ed usb-dongle 4G. Inoltre, è stato inserito un hard disk esterno per consentire la memorizzazione locale dei dati grezzi per scopi di backup.

I dati acquisiti dai sensori lowcost rilevati in tempo reale vengono quindi trasmessi con chiave internet 4G LTE alla piattaforma di monitoraggio.

Stabilita e definita la modalita' di trasmissione dei dati, e' opportuno osservare che la gestione dell'allarmistica (Early Warning) è realizzata dai datalogger Z-GPRS3 tramite un campionamento continuo delle misure provenienti dai sensori sul campo.

I datalogger, tramite le schede SIM e il modem GSM/GPRS di cui sono dotati, effettuano una verifica istantanea di un eventuale superamento di soglia con l'attivazione delle procedure di allerta quali l'invio di un'email e la memorizzazione dell'evento avvenuto.

Gli stessi data-logger memorizzano in locale i dati acquisiti nelle schede SD presenti, gestiscono la trasmissione degli stessi al server centrale (Pc remoto) e permettono di renderli disponibili al gestore. La trasmissione dei dati come file CSV avviene tramite protocollo FTP su rete internet a cadenza prestabilita (ogni 3 ore) ed una serie di programmi dedicati, drivers, provvedono a leggere, elaborare ed archiviare i dati in un sistema DBMS relazionale (nello specifico Microsoft SQL Server) opportunamente configurato per garantire la massima efficienza del sistema e per la creazione automatica di backup (giornaliero/settimanale/mensile) al fine di prevenire perdita dei dati. (figura 4.4)



Figure 4.2 – Trasmissione dati dai sensori ai software

In maniera analoga in relazione alla attività previsionale le fasi di trasmissione dati rimangono uguali a quanto sopra descritto relativamente al caso dell'Early Warning. Per quanto invece riguarda la fase di elaborazione i dati acquisiti, e trasmessi vengono implementati all'interno del server (PC remoto) integrati nel modello finale che simula il comportamento strutturale in modo tale da addestrare una rete neurale che permette di verificare in modo predittivo il comportamento dell'infrastruttura con un campionamento temporale pari a 2 giorni., e successivamente elaborare direttamente tali dati.

I dati una volta elaborati vengono visualizzati sulla piattaforma Word press. (si rimanda al paragrafo 4.7 per una piu' dettagliata descrizione)

#### 4.5. Costruzione del modello strutturale finale: integrazione del modello strutturale con la geometria e i dati acquisiti da sensori

Uno degli aspetti principali correlati al monitoraggio strutturale è quello della previsione del collasso. L'ingegnere strutturale sfrutta i dati dalle ispezioni per elaborare un modello, al fine di predire lo sviluppo temporale del danneggiamento (se presente) e l'eventuale collasso.

In generale, nello studio di ponti e viadotti, è possibile implementare un Modello agli Elementi Finiti (FEM) (utilizzando ad esempio il programma RFEM) semplificato utilizzando elementi unidimensionali (come travi, tralicci e maglie rigide) con proprietà equivalenti a quelle degli elementi reali. Tale semplificazione si traduce in una notevole riduzione del carico computazionale e della memoria necessaria per l'analisi. Ovviamente, un tale modello può solo fornire alcune informazioni sul comportamento complessivo della struttura, utili comunque in fase di progettazione preliminare. Per analizzare in dettaglio gli elementi più importanti di una struttura, sarà necessario utilizzare modelli più complessi. Ovviamente, l'aumento della discretizzazione migliora la precisione dei risultati finali ma aumenta il carico computazionale e quindi i tempi di elaborazione.

Durante la progettazione di una costruzione si conoscono poi le azioni di carico (statiche o dinamiche) e, avendo a disposizione il modello strutturale, tale conoscenza teorica viene combinata per ottenere la previsione della risposta strutturale nelle varie condizioni di interesse (stato di interesse limite di servizio e ultimo stato limite).

Nel caso invece di opere esistenti il monitoraggio strutturale integra le informazioni utilizzate in fase di progettazione. Nel monitoraggio di un'opera esistente vengono effettuati rilievi e prove (in situ o in laboratorio) che forniscono la risposta strutturale a determinate sollecitazioni. In questo caso, quindi, essendo consapevoli della risposta e delle azioni di carico, lo scopo è quello di determinare il modello. Si potrebbe dire che nel primo caso ci occupiamo di un problema diretto, mentre nel secondo caso ci occupiamo del problema inverso.

L'obiettivo principale del monitoraggio è, infatti, creare un modello "finale" che possa essere utilizzato ad esempio per analizzare il comportamento al variare dei carichi applicati.

D'altra parte, è noto come sia possibile ad oggi attraverso i metodi di rilievo della geomatica (Droni – laser scanner) produrre agevolmente ed in tempi brevi modelli 3D con elevate precisioni in grado di fornire informazioni dettagliate sulla geometria della infrastruttura sotto indagine

Altrettanto documentati in letteratura sono i vari sensori di tipo geomatico (GPS) o di altro tipo (accelerometri, inclinometri) in grado di fornire ulteriori informazioni sugli spostamenti e vibrazioni che intercorrono sulla infrastruttura.

A tal fine, il problema principale è quello di riuscire a combinare le informazioni note a priori (derivanti dal monitoraggio) con quelle che si ottengono sperimentalmente durante le ispezioni e le prove sui materiali. Il primo modello è costruito sulla base dei dati geometrici acquisiti (disegni di progetto, rilievi UAV, Rilievi Laser Scanner etc..). Il secondo modello (quello strutturale) invece presenta inevitabilmente degli errori, le cui principali incertezze sono legate ai seguenti parametri:

1. Discrezione,
2. Condizioni al contorno,
3. Parametri caratteristici dei materiali.

L'amplificazione dell'errore dovuto a queste incertezze è valutabile confrontando i valori ricavati dalle prove sul campo, con quelli che possono essere derivati dalle previsioni del modello finale ottenuto.

Una delle soluzioni proposte per risolvere questo problema è l'implementazione del cosiddetto modello "tipo", attraverso l'integrazione dei risultati delle indagini "geomatiche" (modello geometrico e dati da sensori) e del monitoraggio strutturale (modello strutturale).

In questo modo, si ottiene un modello finale (modello "tipo"), che ci permette di analizzare il comportamento della struttura al variare dei carichi applicati.

Per validare la bontà del modello finale ottenuto si confrontano poi le sollecitazioni rilevate con quelle ottenute durante le prove in situ.

Per identificare un'anomalia, invece è necessario eseguire un confronto tra due stati del sistema, (stato di riferimento e stato non conforme), acquisiti chiaramente ad istanti di tempo diversi e successivi

-

#### **4.6. Applicazione tecniche soft computing per la stima del comportamento dell'infrastruttura**

Il problema della stima del comportamento nel tempo della infrastruttura si traduce in sintesi nella determinazione e predizione delle condizioni strutturali al variare del tempo

Ad oggi, dopo aver estrapolato le risposte strutturali dal modello strutturale negli n scenari "virtuali", si effettua un confronto con i dati sperimentali raccolti durante il monitoraggio, e si individua uno scarto che viene utilizzato per aggiornare la modellazione iniziale e pervenire a quella finale.

È possibile, inoltre, eseguire la validazione del modello matematico effettuando un confronto tra le sollecitazioni desunte tramite un software agli elementi finiti e quelle ricavate durante le prove in situ.

La sperimentazione proposta e utilizzata nella presente tesi è basata invece sull'impiego delle tecniche di soft computing (machine learning e reti neurali), quale semplice e rapido strumento di correlazione fra le grandezze misurate (spostamenti) e le proprietà meccaniche del materiale.

Una rete neurale artificiale è, come noto, un modello matematico ispirato alla struttura e agli aspetti funzionali delle reti neurali biologiche di elaborazione delle informazioni, utilizzata nella presente tesi per predire il valore di rischio dell'opera investigata, partendo dall'impiego dei risultati ottenuti dai sensori di spostamento.

D'altra parte è bene ricordare che il grande progresso nel campo della raccolta dei dati mette a disposizione una grande quantità di informazioni eterogenee fra loro, le quali una volta raccolte devono essere opportunamente analizzate per trarne beneficio. Il processo di ispezione, pulizia, trasformazione e modellizzazione dei dati con lo scopo di estrarne informazioni utili è detto Data Analysis.

La Data Analysis è un campo estremamente vasto che comprende numerosi approcci e tecniche in base alla natura dei dati a disposizione e del tipo di risultati da perseguire, (dalla ricerca scientifica, economia e finanza, scienze sociali ed applicazioni tecniche).

Le principali macrocategorie della Data Analysis sono:

– Applicazioni statistiche: gli studi statistici ricorrono a grandi quantità di informazioni utilizzabili in diverse applicazioni e la Data Analysis

può essere applicata per studi descrittivi di un particolare fenomeno, per analisi esplorative (EDA-Explorative Data Analysis) o per la verifica delle ipotesi di un modello di studio (CDA- Confirmatory Data Analysis);

– Data Mining: è una tecnica di analisi che si focalizza nella ricerca di correlazioni e pattern all'interno di grandi dataset. Il termine è spesso usato impropriamente poiché si riferisce all' "estrazione" di pattern dai dati a disposizione e non all'estrazione dei dati stessi. Il Data Mining rispetto ad altre tecniche di analisi è completamente rivolto alla creazione di modelli statistici utilizzati con scopi predittivi, in particolare grazie all'utilizzo del machine learning. Attualmente il compito del Data Mining consiste nella analisi semi-automatizzata di grandi quantità di dati alla ricerca di correlazioni (cluster analysis), anomalie e dipendenze al fine di fornire uno strumento di supporto decisionale in numerosi processi. Le analisi predittive si concentrano sulla creazione di modelli sia per la previsione di fenomeni, sia per problemi di classificazione, come l'analisi di testi nel campo della linguistica e nell'estrazione di informazioni da fonti visive o audiovisive, le cui applicazioni vanno dalla sicurezza negli aeroporti al marketing ( intelligenza artificiale) .

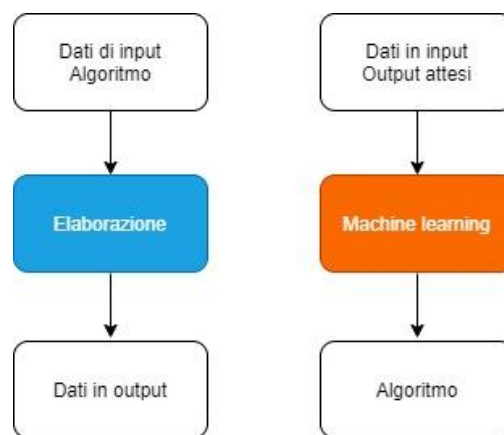
Il processo di Data Analysis è composto da varie fasi che consentono di ottenere una efficace ed affidabile estrapolazione delle informazioni desiderate.

- La prima fase è la raccolta dei dati, durante la quale vengono selezionati tutti i dati, provenienti dalle più diverse fonti, che saranno utilizzati nel corso dell'analisi.
- Segue l'organizzazione dei dati, dove le informazioni raccolte vengono organizzate in maniera omogenea in una forma adatta allo studio che si intende applicare (la struttura più utilizzata è un database organizzato in righe e colonne).
- In seguito, occorre provvedere ad una pulizia dei dati, infatti molti elementi raccolti potrebbero risultare incompleti, ripetuti o errati e il loro utilizzo comporterebbe errori e imprecisioni sul modello di studio.
- Solo dopo aver completato questi passaggi si può procedere con la modellizzazione vera e propria di un algoritmo in grado di identificare pattern ed eventuali correlazioni causa-effetto contenute nei dati.
- L'ultimo passaggio consiste nella produzione di un risultato dell'analisi in grado di fornire un supporto efficace al processo decisionale.

Con il termine machine learning, (apprendimento automatico) , si intende invece un insieme di metodi e strumenti sviluppati nel campo dell'intelligenza artificiale col fine di rendere possibile ad un calcolatore l'apprendimento di pattern senza la necessità di una programmazione



tradizionale esplicita, migliorando progressivamente la qualità dell'analisi effettuata. Il machine learning viene adoperato in tutte quelle situazioni in cui la scrittura di un algoritmo esplicito risulti impossibile o estremamente sconveniente per vari motivi, come ad esempio un numero eccessivo di regole complesse di cui tenere conto, il riconoscimento di immagini o suoni o lo studio di una grande mole di dati di cui non si conosce precisamente la correlazione. L'apprendimento automatico viene spesso utilizzato per elaborare delle predizioni sulla base di dati precedenti sfruttando la principale peculiarità che lo contraddistingue: la capacità di generalizzare in base alla propria esperienza e di produrre dei "ragionamenti induttivi" altrimenti impossibili con un programma tradizionale.



*Figure 4.3 – programma tradizionale (sinistra) e programma di machine learning (destra)*

La caratteristica principale del machine learning è la capacità di imparare e quindi il processo di apprendimento riveste un ruolo cruciale nella fase di creazione del modello. Esistono due approcci principali a questo procedimento. L'inconveniente principale legato all'utilizzo di algoritmi di machine learning è che non è possibile conoscere la struttura analitica dell'algoritmo sviluppato, rendendo, di fatto, quasi impossibile valutare la bontà dello stesso in termini assoluti. Per questo motivo è spesso difficile rilevare o meno la presenza di overfitting nel modello. L'overfitting, o adattamento eccessivo, è infatti un fenomeno che si presenta nei modelli statistici ad elevato grado di complessità e consiste nell'eccessivo adattamento del modello ai dati causato dal numero eccessivo di parametri rispetto al numero di osservazioni. In pratica un modello non corretto si può comunque adattare e fornire risultati apparentemente validi se risulta sufficientemente complesso; questa circostanza può verificarsi se, ad esempio, i dati utilizzati per l'addestramento sono strutturati in un dataset che ha caratteristiche particolari (quali misure ripetute, misure non rappresentative dell'intero problema, etc.); in tal caso l'algoritmo riconoscerà quindi

dei pattern inesistenti, perdendo la capacità di generalizzare nel momento in cui analizzerà dei dataset differenti.

Chiaramente, sono stati sviluppati dei procedimenti per prevenire l'overfitting, tuttavia non esistono dei parametri oggettivi da misurare ed il rischio di incappare in questo inconveniente è sempre presente.

All'interno del sistema di monitoraggio proposto gli algoritmi di machine learning svolgono dunque un ruolo fondamentale: essi permettono di imparare nel dettaglio tutta la casistica di comportamento strutturale analizzando lo storico delle condizioni (nel nostro caso da software) per fornire previsioni sul comportamento futuro al fine di effettuare una manutenzione programmata efficace prima che l'evento si manifesti.

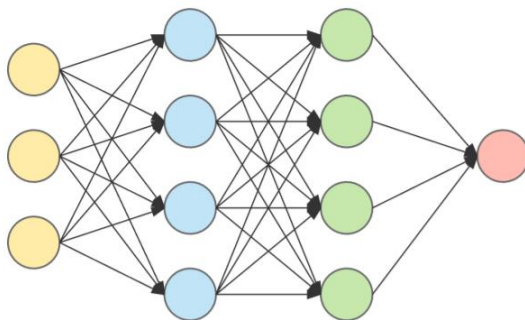
Le reti neurali artificiali (o artificial neural network), sono, come noto, una delle principali branche nel campo del machine learning. Sono dei sistemi di elaborazione dell'informazione che cercano di riprodurre il funzionamento dei sistemi nervosi biologici che avvengono all'interno del cervello umano durante le fasi di apprendimento e di riconoscimento. Esse infatti hanno l'obiettivo di simulare i diversi aspetti legati al comportamento e alle capacità del cervello umano, quali:

- la capacità di elaborazione intelligente delle informazioni,
- elaborazione distribuita,
- elevato livello di parallelismo,
- facoltà di apprendimento, di generalizzazione e di adattamento,
- alta tolleranza ad informazioni poco precise o sbagliate.

Come noto, l'unità principale di una rete neurale è il nodo o percettore (N).

La struttura base prevede:

- Un layer di ingresso, il quale riceve gli input che devono essere elaborati dal sistema;
- Uno o più layer intermedi (detti anche nascosti);
- Un layer finale che fornisce gli output.
- 



*Figura 4.4 – struttura base di una rete neurale artificiale: da sinistra verso destra, layer di input, layer nascosto, layer nascosto, layer di output*

L'elemento fondamentale di una rete neurale è dunque il perceptrone, il quale simula il neurone biologico. Il perceptrone è formato da tre elementi fondamentali:

1. Un numero variabile di connessioni (replica delle sinapsi biologiche), ognuna della quali caratterizzata da un peso, che, differentemente dal corrispettivo biologico, può assumere anche un valore negativo;
2. Un sommatore, il quale somma gli input provenienti dalle varie connessioni in base al loro peso, producendo come output una combinazione lineare degli input ricevuti;
3. Una funzione di attivazione che serve a limitare l'ampiezza dell'output. Solitamente l'output è compreso fra i valori  $[0,1]$  o  $[-1,1]$ . Il perceptrone comprende anche un valore soglia che permette di amplificare o ridurre l'input netto elaborato dalla funzione di approssimazione.

Da un punto di vista matematico un neurone  $k$  può essere rappresentato dalle seguenti equazioni:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k)$$

Dove:

- $x_j$  sono i pesi sinaptici del neurone  $k$ ;
- $u_k$  è la combinazione lineare degli input del neurone  $k$ ;
- $b_k$  è il valore di soglia del neurone  $k$ ;
- $\varphi(x)$  è la funzione di attivazione;
- $y_k$  è l'output elaborato dal neurone  $k$ .

Ogni neurone che compone uno strato riceve degli input dai neuroni degli strati precedenti che vengono combinati in un unico valore che rappresenta l'input della funzione di attivazione.

Le funzioni di attivazioni devono rispettare dei criteri:

- ricevere degli input normalizzati
- fornire un output quanto più possibile prossimo ad 1 se adeguatamente stimolata.

Esistono tre tipi di funzione di attivazione generalmente utilizzati nelle reti neurali. Nella presente tesi sono state applicate funzioni che rientrano tra le funzioni sigmoidee. Queste funzioni sono strettamente crescenti e comportano un bilanciamento fra un andamento lineare ed un andamento non lineare.

Sono definite come:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}}$$

Dove  $a$  è un parametro che permette di variare la pendenza della funzione si noti come per  $a \rightarrow +\infty$  la funzione approssima l'andamento della funzione gradino. Questa funzione viene utilizzata perché spesso è utile una normalizzazione dei dati nell'intervallo  $[-1,1]$ .

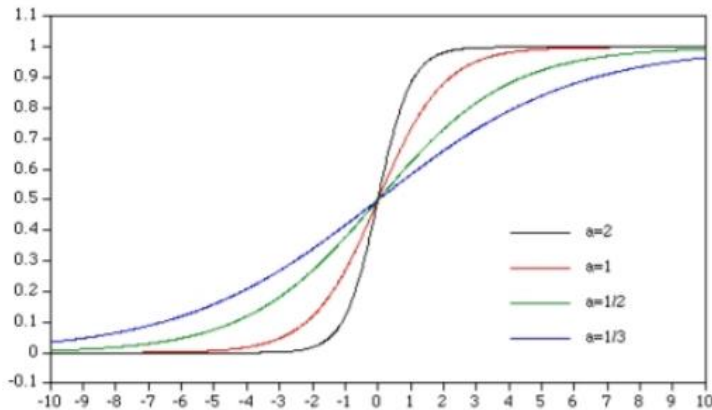


Figure 4.5 – funzioni di attivazione al variare di  $a$

A questo gruppo di funzioni appartengono la tangente iperbolica

$$\varphi(v) = \tanh(a \cdot v)$$

e la funzione rettificatore

$$\varphi(v) = v + \max(0, v)$$

indicata come ReLU (dall'inglese Rectified Linear Unit).

Lo strato finale di una rete necessita di un tipo particolare di funzione di attivazione; la più utilizzata è la funzione softmax.

$$g_k(T) = \frac{e^{T_k}}{\sum_{l=1}^K e^{T_l}} \quad (7)$$

Dove  $T$  è il vettore di output.

In relazione poi alla fase di addestramento è bene ricordare che l'apprendimento supervisionato è la soluzione più utilizzata per l'addestramento delle reti neurali. Nell'apprendimento supervisionato vengono sottoposti alla rete degli input ognuno dei quali è correlato a specifici output, detti etichette (labels). L'insieme di questi input e dei rispettivi labels costituisce il training set. Nel processo di apprendimento i parametri liberi della rete, ossia il peso dei collegamenti, vengono modificati, attraverso una stimolazione, rispetto alle condizioni in cui essa è inserita. Come visto in precedenza, esistono varie strategie per effettuare l'apprendimento della rete, il più utilizzato è l'apprendimento attraverso la riduzione dell'errore.

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n)$$

Dove:

- $d_k(n)$  è la risposta attesa dal  $k$ -esimo neurone;
- $y_k(n)$  è la risposta generata dal sistema dal  $k$ -esimo neurone;

-  $e_k(n)$  è il segnale di errore del k-esimo neurone.

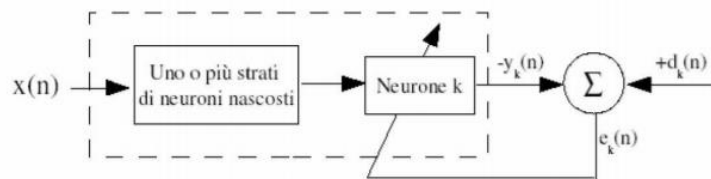


Figure 4.6 – struttura correzione errore

Il segnale di errore attiva un procedimento di autocontrollo del sistema attraverso una serie di aggiustamenti del peso di ogni connessione del k-esimo neurone con l'obiettivo di ridurre la differenza fra la risposta generata e la risposta attesa.

Questo procedimento avviene uno step alla volta andando a minimizzare una funzione costo:

$$E(n) = \frac{1}{2} \cdot e_k^2(n)$$

La minimizzazione della funzione costo avviene attraverso il metodo della discesa del gradiente. Chiamati  $w_{kj}(n)$  i pesi delle connessioni del k-esimo neurone eccitati da un input  $x_j(n)$  l'aggiustamento effettuato su  $w_{kj}(n)$  è definito come:

$$\Delta w_{kj} = \eta \cdot e_k(n) \cdot x_j(n)$$

Dove  $\eta$  è una costante positiva chiamata tasso di apprendimento.

I nuovi pesi così calcolati saranno:

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n)$$

Il meccanismo di apprendimento attraverso la correzione dell'errore costituisce un sistema ricorrente in cui la stabilità dello stesso dipende dai parametri che lo costituiscono, in modo particolare da  $\eta$  poiché influenza direttamente la convergenza e la stabilità dell'intero processo. In seguito all'addestramento le prestazioni della rete (validation test) sono valutate per mezzo di un insieme di input e labels differenti dal training set. Attraverso il validation test viene testata la capacità di generalizzazione da parte della rete (è fondamentale che questi dati non siano mai stati visualizzati in precedenza dal sistema).

I principali algoritmi per l'apprendimento supervisionato sono:

- K-Nearest neighbors (KNN);
- Logistic Regression (LR);
- Support Vector Machine (SVM);
- Decision Tree (DT);
- Random Forest (RF);
- Artificial Neural Network (ANNs).

Nell'apprendimento non supervisionato vengono presentati alla rete un insieme di input a cui, (differentemente rispetto all'apprendimento supervisionato) non sono associate etichette. La classificazione degli input sarà svolta dal sistema andando ad analizzare i dati e trovando

caratteristiche in comune fra di essi e provvedendo ad elaborare la classificazione. Questo genere di apprendimento è utilizzato nei problemi di clustering, nei quali la conoscenza delle correlazioni fra i dati non è nota a priori e il compito della rete neurale consiste proprio nella loro individuazione; l'utilizzo di un apprendimento supervisionato risulterebbe impraticabile per questa tipologia di problemi.

L'attività di apprendimento può essere eseguita in vari modi. Nella presente tesi è stata utilizzata l'associazione di Pattern. Cioè viene sviluppata una memoria associativa, ossia una memoria distribuita che apprende per associazioni. Le associazioni possono essere di due tipi:

- Autoassociazioni: vengono memorizzati i pattern presentando alla rete gli input varie volte. In questo caso quando alla rete viene presentato un nuovo input essa cerca di richiamare i pattern memorizzati anche nel caso in cui questi siano parziali o distorti. Solitamente il processo di apprendimento non è supervisionato;
- Eteroassociazioni: durante l'apprendimento ogni pattern viene associato ad un altro pattern. Si ha dunque un pattern chiave  $x_k$  al quale viene associato un pattern  $y_k$  che viene memorizzato. Il pattern  $x_k$  funge da stimolo per richiamare il pattern  $y_k$ . Rispetto al caso precedente ( $x_k = y_k$ ) l'abbinamento è  $x_k \neq y_k$ . Il processo di associazione avviene in due fasi: nella prima, detta di memorizzazione, avviene l'associazione dei pattern, nella seconda, detta di richiamo, il pattern memorizzato viene richiamato in maniera integrale o parziale da uno stimolo.

In questo procedimento il pattern viene associato ad una specifica classe o categoria. In seguito al processo di addestramento (nel quale il pattern viene presentato più volte) la rete è in grado di riconoscere i pattern che le vengono sottoposti in base alle categorie con le quali sono stati classificati. Nel caso in cui venisse sottoposto alla rete un pattern mai incontrato in precedenza, la rete provvederà a creare una nuova categoria sfruttando le conoscenze apprese dai pattern già noti. Ogni pattern costituisce un singolo punto all'interno dello spazio di decisioni multidimensionale. Lo spazio decisionale è composto da varie regioni ad ognuna delle quali è associata una categoria. Il processo di apprendimento definisce il confine fra le varie regioni. Il riconoscimento di pattern può essere effettuato in due modi:

- La rete viene suddivisa in due parti. Una sottorete non supervisionata che estrapola le caratteristiche ed una sottorete supervisionata che effettua la classificazione;
- L'attività di estrapolazione e classificazione avviene in ogni singolo strato nascosto che compone la rete.

Lo scopo finale di una rete neurale è dunque quello di sviluppare la capacità di generalizzare efficacemente una tipologia di problemi. Una generalizzazione è corretta quando la mappa di input e output generata

durante la fase di apprendimento è corretta per degli esempi di test mai visionati in precedenza dalla rete (il set di dati usati per il test appartiene alla medesima popolazione dei dati usati per il training). La capacità di generalizzare è simile ad un problema di approssimazione di una curva: considerando la rete neurale come una mappa non lineare degli input e degli output, una buona generalizzazione equivale ad una buona interpolazione rispetto ai dati di input  $i$ . Una generalizzazione efficace consente di produrre una mappatura corretta anche se gli input utilizzati sono lievemente differenti rispetto a quelli utilizzati durante l'addestramento; una rete che ha visionato troppi esempi (coppie input output) nella fase di training corre il rischio di perdere la capacità di generalizzare correttamente andando a memorizzare informazioni non necessarie. Questo fenomeno è chiamato overfitting

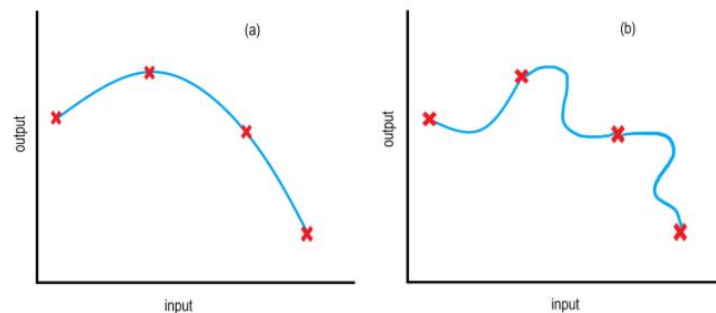


Figure 4.7 – esempio di generalizzazione

La generalizzazione è funzione di tre fattori:

- La dimensione del set di dati usato per addestrare il modello;
- La dimensione e il tipo di reti neurali;
- La complessità del problema analizzato.

La complessità del problema che si vuole studiare con la rete neurale è un fattore sul quale non è possibile apportare modifiche, dunque per migliorare le prestazioni della rete occorre intervenire sugli altri due punti. Nel caso in cui la struttura della rete sia prefissata bisogna stabilire la dimensione ottimale del set di dati da usare nell'addestramento, nel caso in cui sia prefissata la quantità di dati del training set bisogna determinare la struttura ottimale della rete. Una regola empirica che consente di ottenere buone generalizzazioni consiste nel rispettare la seguente condizione:

$$N = O(W \varepsilon)$$

Dove:

- $N$  è la dimensione del set di dati usato per l'addestramento;
- $W$  è il numero di parametri liberi della rete;

-  $\epsilon$  è la frazione di errori di classificazione sul set di dati usato per il test.  
Di seguito è riportato un diagramma di flusso che schematizza il processo di addestramento di una rete neurale.

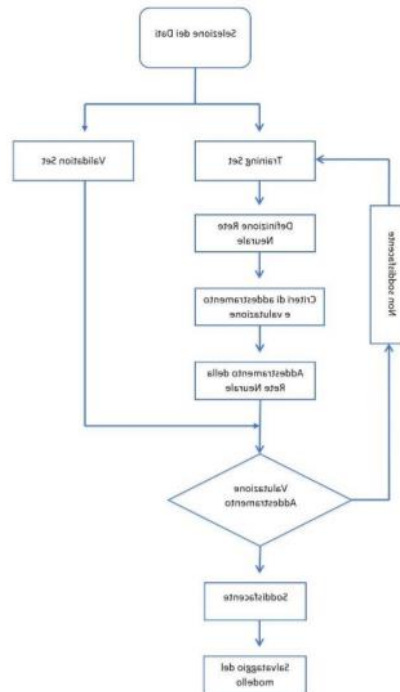


Figura 4.10– flow chart addestramento rete neurale

Il modello creato necessita di avere una funzione da minimizzare (Loss) ed un ottimizzatore. In base al fenomeno analizzato si adoperano diverse funzioni, le due più utilizzate sono `binary_crossentropy` (nel caso in cui occorra calcolare delle probabilità) e `mean_squared_error` (usata nei modelli di predizione). Esistono vari ottimizzatori implementati nelle API Keras, ognuno con le sue peculiarità ed ognuno adatto ad uno specifico modello di calcolo. Il più utilizzato è l'`AdamOptimizer`, particolarmente preformante nelle applicazioni stocastiche.

Come visto in precedenza il modello viene addestrato a riconoscere un determinato pattern attraverso la fase di apprendimento e ci si aspetta che sia in grado di generalizzare questo pattern anche con dati differenti, ossia di predire i risultati anche su dati che non ha mai visto in precedenza. Tuttavia, come precedentemente ricordato, se l'apprendimento è stato eccessivo si corre il rischio che il modello perda la capacità di generalizzare (*overfitting*) poiché è troppo adattato ai dati usati per istruirlo (tipicamente si focalizza su alcuni aspetti tipici esclusivamente del training set, ma assenti nella maggior parte degli altri casi). Esiste però anche l'eventualità contraria, cioè che il modello



non sia stato addestrato in maniera sufficiente. Questo fenomeno può verificarsi per vari motivi: i dati analizzati non sono organizzati in maniera adeguata, il modello richiede una complessità della rete (numero di strati e di neuroni) maggiore o i dati analizzati non sono abbastanza. Il tutto si traduce di nuovo nell'incapacità di generalizzare. Spesso risulta difficile valutare la qualità di un modello in maniera univoca, ma esistono alcune regole empiriche che permettono di effettuare una valutazione qualitativa sull'addestramento della rete. È buona norma implementare una cross-validation, ossia la divisione del training set in due insiemi distinti:

- Training sub-set: effettivamente usato per l'addestramento del modello;
- Validation sub-set: usato per la validazione del modello.

Osservando l'andamento reciproco dell'accuratezza dei due set di dati all'aumentare delle epoche dell'addestramento è possibile individuare eventuali fenomeni di overfitting e underfitting. Un modello in underfitting ha una precisione migliore sul training sub-set rispetto al validation sub-set e questo può essere facilmente identificato se la curva del training sta al di sotto della curva del validation e quest'ultimo ha un andamento che suggerisce un miglioramento nel caso di un numero maggiore di epoche.

Un modello con delle buone performance presenta un andamento convergente del training e validation set, in cui entrambi diminuiscono e si stabilizzano attorno allo stesso valore.

In fine un modello affetto da overfitting è caratterizzato da prestazioni del training set che continuano ad aumentare mentre quelle del validation, ad un certo punto, tendono a peggiorare. Si nota solitamente che la curva di validation ha un minimo oltre il quale cambia pendenza.

Per quanto riguarda la specifica applicazione inerente la sperimentazione portata avanti nella presente tesi, ferme restando le considerazioni sopra riportate, si osserva che la rete neurale è stata implementata in google Colab (Piattaforma per eseguire codice in linguaggio Python) usando Tensor FloW (libreria software open source per l'apprendimento automatico (machine learning)) che, grazie alle API Keras, consente di implementare alcune funzioni utili a prevenire l'overfitting e l'underfitting.

In linea di principio il modo migliore per addestrare il modello consiste nel fargli visionare il maggior numero di dati differenti possibile, ma come abbiamo visto il rischio di incorrere in overfitting è sempre presente e, purtroppo, non esistono dei parametri analitici che possono indicare in maniera univoca la presenza di overfitting. Si può tuttavia ricorrere ad alcuni accorgimenti nella scrittura del codice che permettono di ridurre al minimo l'overfitting o riuscire ad intuire

quando esso si verifica. Una possibilità consiste nell'implementare una funzione che controlli il miglioramento della predizione rispetto ai dati attesi mano a mano che aumenta il numero di epoche ed interrompere l'addestramento nel momento in cui non si registrino più miglioramenti significativi. Questo metodo è detto "early stopping" ed è facilmente implementabile in Tensorflow attraverso una specifica funzione (utilizzata nella presente sperimentazione).

```
model = build_model()
# The patience parameter is the amount of epochs to check for
improvement
early_stop = keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='val_loss',
patience=20)
history = model.fit(train_data, train_labels, epochs=10000,
validation_split=0.2, verbose=0, callbacks=[early_stop, PrintDot()])
plot_history(history)
```

Questa operazione viene fatta per validare la rete con dei dati differenti da quelli utilizzati nella fase di training, è così possibile valutare il set di addestramento calcolando l'errore alla fine di ogni epoca. Osservando l'andamento dell'errore quadratico medio riferito all'estimation sub-set si nota come esso si riduca all'aumentare delle epoche portando a pensare che la precisione aumenti in maniera inversamente proporzionale ad esse. Tuttavia una volta superato il punto di early stopping la rete apprende solamente il rumore contenuto nei dati, quindi proseguire l'addestramento risulta dannoso.

#### 4.7. Piattaforma di Visualizzazione

La piattaforma di visualizzazione dei dati acquisiti sia nel caso di Early Warning sia nel caso predittivo è stata implementata nell'ambiente WordPress®.

Allo stesso tempo, al fine di prevenire gli svantaggi insiti nella programmazione in WordPress®, sono stati integrati i protocolli di sicurezza SSL, che fornivano un livello fondamentale di sicurezza online, essenziale per la trasmissione di informazioni sensibili. A questo punto i dati sono dunque visibili su piattaforma di visualizzazione e direttamente utilizzabili in applicazioni di early warning.

WordPress è una piattaforma software di "blog" e content management system (CMS) open source ovvero un programma che, girando lato server, consente la creazione e distribuzione di un sito Internet formato da contenuti testuali o multimediali, gestibili ed aggiornabili in maniera dinamica. È sviluppato in PHP con appoggio al gestore di database MySQL.

WordPress permette di realizzare portali web con l'ausilio di opportuni plugin. Si tratta di moduli che estendono le funzionalità dell'applicativo

e aggiungono nuove caratteristiche ed elementi ai siti realizzati. Per esempio esistono plugin, gratuiti o a pagamento, che estendono le funzionalità dell'editor integrato di WordPress, o che permettono di inserire funzionalità di gestione SEO (Search Engine Optimization e definisce tutte le attività di ottimizzazione di un sito web) al sito, o di inserire uno slideshow nelle pagine del sito realizzato con WordPress regolandone le caratteristiche in modalità drag and drop direttamente dall'editor integrato.

Iscrivendosi dal portale [wordpress.com](http://wordpress.com) è possibile creare un sito utilizzando WordPress gratuitamente, ma non è possibile usufruire dei plugin per aggiungere funzionalità. Per poterli utilizzare è necessario sottoscrivere un piano a pagamento sul portale di WordPress oppure comprare un servizio di hosting, che supporti PHP e MySQL e scaricare nel proprio spazio web il software WordPress.

Il sito può essere esposto a rischi o attacchi come virus, spam, violazioni di password e login, furto di informazioni e dati. Per questo è sempre utile installare un plugin per la sicurezza al fine di migliorare ed estendere le funzioni di sicurezza base di WordPress.

**Bibliografia**

- Leonardi, G.; Palamara, R.; Cirianni, F. Landslide Susceptibility Mapping Using a Fuzzy Approach. *Procedia Eng.* 2016, 161, 380–387. [Google Scholar] [CrossRef]
- Barilla, D.; Leonardi, G.; Puglisi, A. Risk assessment for hazardous materials transportation. *Appl. Math. Sci.* 2019, 3, 2295–2309. [Google Scholar]
- Chen, S.-E.; Liu, W.; Dai, K.; Bian, H.; Hauser, E. Remote sensing for bridge monitoring. In *Condition, Reliability, and Resilience Assessment of Tunnels and Bridges*; Geotechnical Special Publication: Reston, VA, USA, 2011; Volume 214, pp. 118–125. [Google Scholar]
- Fukuda, Y.; Feng, M.Q.; Narita, Y.; Kaneko, S.; Tanaka, T. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm. *IEEE Sens. J.* 2013, 13, 4725–4732. [Google Scholar] [CrossRef]
- Gentile, C.; Cabboi, A. Vibration-based structural health monitoring of stay cables by microwave remote sensing. *Smart Struct. Syst.* 2015, 16, 263–280. [Google Scholar] [CrossRef]
- Harris, D.K.; Brooks, C.N.; Ahlborn, T.M. Synthesis of field performance of remote sensing strategies for condition assessment of in-service bridges in Michigan. *J. Perform. Constr. Facil.* 2016, 30, 04016027. [Google Scholar] [CrossRef]
- Vaghefi, K.; Oats, R.C.; Harris, D.K.; Ahlborn, T.M.; Brooks, C.N.; Endsley, K.A.; Roussi, C.; Shuchman, R.; Burns, J.W.; Dobson, R. Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment. *J. Bridge Eng.* 2012, 17, 886–895. [Google Scholar] [CrossRef]
- Nakamura, S.-I. GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. *J. Struct. Eng.* 2000, 126, 1413–1419. [Google Scholar] [CrossRef]
- Moschas, F.; Stiros, S. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Eng. Struct.* 2011, 33, 10–17. [Google Scholar] [CrossRef]
- Gikas, V. Ambient vibration monitoring of slender structures by microwave interferometer remote sensing. *J. Appl. Geod.* 2012, 6, 167–176. [Google Scholar] [CrossRef]
- Kalooop, M.R.; Li, H. Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement* 2014, 47, 531–539. [Google Scholar] [CrossRef]
- Elnabwy, M.T.; Kalooop, M.R.; Elbeltagi, E. Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique. *Measurement* 2013, 46, 4282–4292. [Google Scholar] [CrossRef]
- Voutetaki, M.E.; Papadopoulos, N.A.; Angeli, G.M.; Providakis, C.P. Investigation of a new experimental method for damage assessment of RC beams failing in shear using piezoelectric transducers. *Eng. Struct.* 2016, 114, 226–240. [Google Scholar] [CrossRef]
- Karayannis, C.G.; Voutetaki, M.E.; Chalioris, C.E.; Providakis, C.P.; Angeli, G.M. Detection of flexural damage stages for RC beams using Piezoelectric sensors (PZT). *Smart Struct. Syst.* 2015, 15, 997–1018. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chen, Y.; Xue, X. Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers. *Sensors* 2018, 18, 4312. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Liao, W.I.; Hsiao, F.P.; Chiu, C.K.; Ho, C.E. Structural health monitoring and interface damage detection for infill reinforced concrete walls in seismic retrofit of reinforced concrete frames using piezoceramic-based transducers under the cyclic loading. *Appl. Sci.* 2019, 9, 312. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chalioris, C.E.; Papadopoulos, N.A.; Angeli, G.M.; Karayannis, C.G.; Liolios, A.A.; Providakis, C.P. Damage evaluation in shear-critical reinforced concrete beam using piezoelectric transducers as smart aggregates. *Open Eng.* 2015, 5, 373–384. [Google Scholar] [CrossRef]
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A. Point cloud segmentation using image processing techniques for structural analysis. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019, 187–193. [Google Scholar] [CrossRef]
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A.; Bernardo, E. UAV Survey of Bridges and Viaduct: Workflow and Application. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in*

- Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 195–199. [Google Scholar]
- Pucinotti, R.; Fiordaliso, G. Multi-Span Steel–Concrete Bridges with Anti-Seismic Devices: A Case Study. *Front. Built Environ.* 2019, 72, 1–15. [Google Scholar] [CrossRef]
- Cristofaro, M.T.; Pucinotti, R.; Tanganelli, M.; De Stefano, M. The dispersion of concrete compressive strength of existing buildings. *Geotech. Geol. Earthq. Eng.* 2015, 33, 275–285. [Google Scholar]
- Pucinotti, R. Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 75, 331–341. [Google Scholar] [CrossRef]
- Pucinotti, R. Assessment of in situ characteristic concrete strength. *Constr. Build. Mater.* 2013, 44, 63–73. [Google Scholar] [CrossRef]
- Bursi, O.S.; Bonelli, A.; Mammino, A.; Pucinotti, R.; Tondini, N. External post-tensioning retrofitting and modelling of steel–concrete boxgirder bridges. In *Proceedings of the 7th International Conference on Steel Bridges*, Guimaraes, Portugal, 4–6 June 2008; pp. 425–434. [Google Scholar]
- Moschasa, F.; Stiros, S. Noise characteristics of short-duration, high frequency GPS-records Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing. *Ser. Adv. Math. Appl. Sci.* 2012, 84, 284–291. [Google Scholar]
- Psimoulis, P.A.; Stiros, S.C. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and robotic theodolites (RTS) records. *Comput. Struct.* 2012, 92–93, 337–348. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chen, S.-E.; Liu, W.; Dai, K.; Bian, H.; Hauser, E. Remote sensing for bridge monitoring. In *Condition, Reliability, and Resilience Assessment of Tunnels and Bridges*; Geotechnical Special Publication: Reston, VA, USA; Volume 214, pp. 118–125 (2011).
- Fukuda, Y.; Feng, M.Q.; Narita, Y.; Kaneko, S.; Tanaka, T. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm. *IEEE Sens. J.*, 13, 4725–4732 (2013).
- Gentile, C.; Cabboi, A. Vibration-based structural health monitoring of stay cables by microwave remote sensing. *Smart Struct. Syst.*, 16, 263–280 (2015).
- Harris, D.K.; Brooks, C.N.; Ahlborn, T.M. Synthesis of field performance of remote sensing strategies for condition assessment of inservice bridges in Michigan. *J. Perform. Constr. Facil.*, 30, 04016027, (2016).
- Vaghefi, K.; Oats, R.C.; Harris, D.K.; Ahlborn, T.M.; Brooks, C.N.; Endsley, K.A.; Roussi, C.; Shuchman, R.; Burns, J.W.; Dobson, R. Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment. *J. Bridge Eng.*, 17, 886–895 (2012).
- Moschas, F.; Stiros, S. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Eng. Struct.*, 33, 10–17 (2011).
- Kalooop, M.R.; Li, H. Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement*, 47, 531–539 (2014).
- Elnabwy, M.T.; Kalooop, M.R.; Elbeltagi, E. Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique. *Measurement*, 46, 4282–4292, (2013).
- Voutetaki, M.E.; Papadopoulos, N.A.; Angeli, G.M.; Providakis, C.P. Investigation of a new experimental method for damage assessment of RC beams failing in shear using piezoelectric transducers. *Eng. Struct.*, 114, 226–240 (2016).
- Karayannis, C.G.; Voutetaki, M.E.; Chalioris, C.E.; Providakis, C.P.; Angeli, G.M. Detection of flexural damage stages for RC beams using Piezoelectric sensors (PZT). *Smart Struct. Syst.*, 15, 997–1018 (2015).
- Chen, Y.; Xue, X. Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers. *Sensors*, 18, 4312. (2018)
- Liao, W.I.; Hsiao, F.P.; Chiu, C.K.; Ho, C.E. Structural health monitoring and interface damage detection for infill reinforced concrete walls in seismic retrofit of reinforced concrete frames using piezoceramic-based transducers under the cyclic loading. *Appl. Sci.*, 9, 312 (2019).
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A. Point cloud segmentation using image processing techniques for

- structural analysis. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 187–193 (2019).
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A.; Bernardo, E. UAV Survey of Bridges and Viaduct: Workflow and Application. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 195–199 (2019).
- Pucinotti, R.; Fiordaliso, G. Multi-Span Steel–Concrete Bridges with Anti-Seismic Devices: A Case Study. *Front. Built Environ.*, 72, 1–15 (2019).
- Moschasa, F.; Stiros, S. Noise characteristics of short-duration, high frequency GPS-records *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing. Ser. Adv. Math. Appl. Sci.*, 84, 284–291 (2012).
- Psimoulis, P.A.; Stiros, S.C. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and robotic theodolites (RTS) records. *Comput. Struct.*, 92–93, 337–348 (2012).

## CAPITOLO V

Applicazione della metodologia proposta a casi reali





## 5. Applicazione della metodologia proposta a casi reali

### Introduzione

Questo capitolo dedicato alle applicazioni effettuate per sperimentare le metodologie ampiamente descritte nei precedenti paragrafi riprende quanto già presentato in alcuni articoli scientifici prodotti durante il percorso di dottorato:

- (2020) Barrile, V., FOTIA, A., Leonardi, G., Pucinotti, R. - Geomatics and soft computing techniques for infrastructural monitoring – In: Mdpi Sustainability (Switzerland), 2020, 12(4), 1606 DOI: 10.3390/su12041606
- (2020) Barrile, V; FOTIA, A; Bernardo E; Bilotta G, Modafferi A. - Road infrastructure monitoring: an experimental geomatic integrated system. In: ICCSA, 2020 20th International Conference, Cagliari, Italy, July 1–4, 2020.
- (2019) Barrile V, Candela G, FOTIA A, Bernardo E - UAV Survey of Bridges and Viaduct: Workflow and Application – In: ICCSA 2019: Computational Science and Its Applications – 19th International Conference, Saint Petersburg, Russia, July 1–4, 2019
- (2019) Barrile V, Candela G, FOTIA A – Point Cloud segmentation using image processing techniques for structural analysis – In: 2nd International Conference of Geomatics and Restoration (Volume XLII-2/W11) 8–10 May 2019, Milan, Italy

Più in particolare, in questo capitolo vengono presentati i casi applicativi sui quali è stata sperimentata, testata e validata la metodologia proposta secondo il seguente schema:

- Scelta dei casi studio
- Rilievo da drone e modellazione tridimensionale
- Acquisizione dati da sensori
- Costruzione del modello strutturale
- Realizzazione di un modello finale: aggiornamento del modello strutturale con la geometria (modello 3D da drone) e con le diverse condizioni di carico
- Applicazione delle tecniche di soft computing per la stima e la previsione del comportamento dell'infrastruttura nel tempo
  - o Sistema di Trasmissione dati
  - o Visualizzazione della risposta monitorata sia in termini di Early Warning che di risposta predittiva sul comportamento della infrastruttura nel tempo

Nel particolare viene presentata dunque la progettazione e successiva realizzazione di un sistema integrato hardware/software per monitorare il territorio e il costruito, che integra le metodologie geomatiche alle metodologie della soft computing al fine di introdurre automazioni nella raccolta, nell'elaborazione, previsione e trasmissione dei dati, finalizzato da un lato all'Early Warning e dall'altro alla previsione del comportamento nel tempo della infrastruttura.

Più in particolare, quindi si è voluto da un lato finalizzare l'uso delle tecnologie geomatiche (integrate anche dall'utilizzo di sensori in loco) a problematiche di Early Warning, e dall'altro attraverso tecniche di soft computing introdurre automatismi nella raccolta ed elaborazione e previsione di dati (fig.5.1).

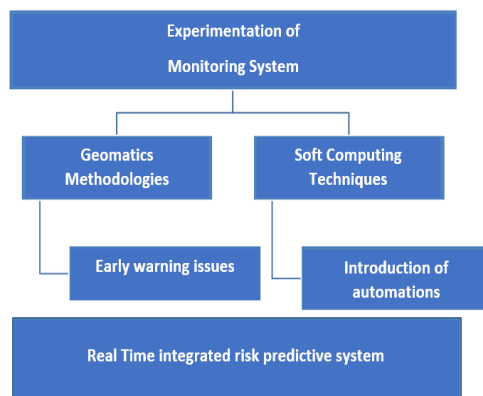


Figure 5.1 – Schema unità centrale sistema

Il fine ultimo, dunque, è stato quello di creare un sistema predittivo del rischio in tempo reale che permetta da un lato di simulare diversi scenari e, quindi, vari comportamenti delle infrastrutture oggetto di indagine (analisi previsionale), e dall'altro di allertare i soggetti preposti, in caso di pericoli imminenti (analisi di Early warning).

Il sistema proposto utilizza dati di diversa natura (anche in fase preventiva per definire i vari scenari di comportamento dell'infrastruttura sul modello strutturale), rielaborandoli poi attraverso tecniche di machine learning, al fine di ottenere valori previsionali da confrontare con soglie limite rappresentanti differenti livelli di rischio (soglie).

L'architettura del sistema (riportata e schematizzata nel flow chart di figura 5.2.) consta (prescindendo dai dati iniziali utili per definire i vari scenari di comportamento della infrastruttura e costituiti nella presente sperimentazione da: carichi agenti sull'infrastruttura sia artificiali (traffico giornaliero medio) - che naturali (vento, eventuali portate d'acqua agenti sulle pile, capacità del terreno) di:

- un sistema di acquisizione dati (sistemi uav - sistema GNSS – Sensori accelerometrici)
- un sistema di soft computing che utilizza una idonea rete neurale sia in fase di addestramento (utilizzando i diversi scenari di comportamento della infrastruttura) che in fase previsionale (richiedendo in fase di input una volta addestrata la rete esclusivamente dati di spostamento (statici e dinamici), per produrre i livelli di rischio.
- un sistema di trasmissione dati.
- un sistema centrale di elaborazione della totalità dei dati e dei modelli e successiva visualizzazione dei risultati.

I risultati del sistema e dunque le eventuali segnalazioni di criticità sono ottenute da un lato direttamente confrontando i valori acquisiti con valori di soglia e dall'altro attraverso l'analisi e la simulazione di eventuali scenari futuri su di un modello “finale” elaborando il tutto attraverso un sistema previsionale basato sull'uso di una idonea rete neurale opportunamente implementata.

Tale modello “finale” viene costruito dalla integrazione di più modelli rappresentativi dell'oggetto di studio (infrastruttura):

- un modello 3D rilevato da drone (utile per avere a disposizione lo stato di fatto iniziale e le informazioni di tipo geometrico della struttura da monitorare),
- un modello strutturale all'istante “0” sul quale vengono variate più condizioni al contorno per simulare altrettanti scenari (scenario n).

Il modello finale così ottenuto viene integrato con i dati acquisiti in real-time dal sistema di sensori (spostamenti).

I dati vengono dunque elaborati attraverso un sistema di reti neurali che permettono di restituire il comportamento previsionale nel tempo della infrastruttura a fronte degli spostamenti rilevati.

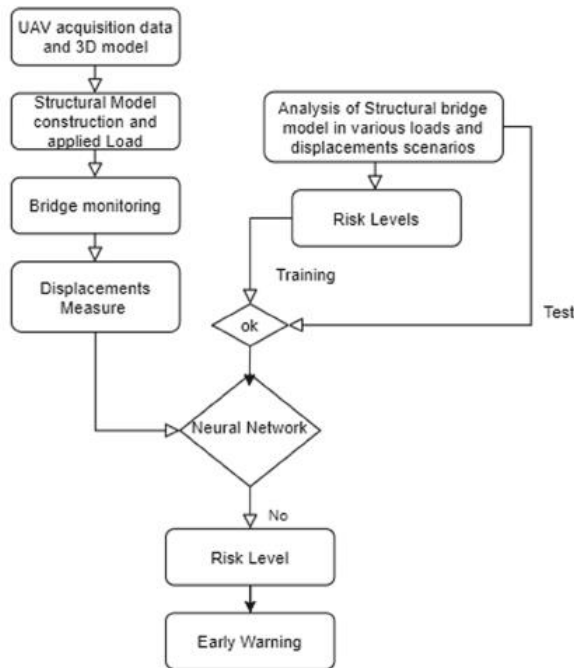


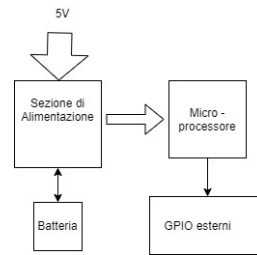
Figura 5.2 – Schema unità centrale sistema

Tutto il prototipo è dunque basato su di una centralina, installata nelle prossimità del viadotto (fig. 5.3) che raccoglie i dati dei vari sensori li invia ad una piattaforma di elaborazione dati (server centrale posto all'interno dei locali del laboratorio di Geomatica del Diceam dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria) dove è implementato tutto il sistema che può essere gestito da un operatore in grado di visualizzare i dati di output sia in relazione alla fase di Early Warning che a quella previsionale sul comportamento della infrastruttura nel tempo.



Figura 5.3 - Centralina di Controllo

La centralina del sistema può essere schematicamente rappresentata come in figura (fig. 5.4).



**Figura 5.4 - Schema centralina**

Più nel dettaglio, all'interno del server centrale (pc posto all'interno dei locali del laboratorio di Geomatica):

- viene elaborato il modello “finale” (integrazione del modello strutturale e del modello geometrico 3d),
- vengono prodotti i vari scenari futuri al variare dei carichi (utilizzando i dati iniziali acquisiti in via preventiva una sola volta al tempo  $t=0$ )
- vengono raccolti i dati da sensore di spostamento nel tempo trasmessi dalla centralina installata in prossimità del viadotto / ponte
- Viene implementato il sistema di soft computing utile per la fase della predizione del comportamento della infrastruttura nel tempo
- Vengono comparate le misure di spostamento ricevute con dei valori soglia al fine di produrre un Early Warning
- Vengono confrontati i dati ottenuti dal processo di soft computing inserendoli in fasce di rischio al fine di individuare un comportamento nel tempo dell'infrastruttura
- Vengono visualizzati i risultati dell'Early Warning
- Vengono visualizzati i risultati del sistema predittivo

Per la fase di trasmissione dei dati, si rimanda al capitolo 4 osservando che la trasmissione dati cambia in funzione della tipologia di sensore utilizzato. Nel particolare:

- I dati inviati dal ricevitore GNSS sul quale è installato il firmware VADASE vengono trasmessi da un semplice sistema di trasmissione dati. Infatti, il ricevitore è dotato di un software integrato per la registrazione dei dati (data login) e un sistema di invio FTP push. grazie al quale gli eventi di spostamento vengono trasmessi in streaming (o registrati a bordo del ricevitore) e inviati all'utente tramite e-mail.
- I dati da sensori a singola frequenza sono trasmessi attraverso un modulo radio per la comunicazione tra master e Rover; il sistema di trasmissione dati è stato realizzato mediante l'accoppiamento di un Raspberry pi 3 ed usb-dongle 4G.

Inoltre, è stato inserito un hard disk esterno per consentire la memorizzazione locale dei dati grezzi per scopi di backup.

- i dati acquisiti dai sensori lowcost rilevati in tempo reale vengono trasmessi con chiave internet 4G LTE alla piattaforma di monitoraggio.
- I dati provenienti dai sensori distribuiti sul campo necessari per la calibrazione del modello finale (dati acquisiti in via preventiva al tempo  $t=0$ ), vengono convogliati tramite il cavo Ethernet con protocollo Modbus al sistema di raccolta dati (datalogger, moduli IO, radiomodem) presente nel pannello di accentramento e sono in grado di acquisire, elaborare e trasmettere le misure rilevate.

La gestione dell'allarmistica (Early Warning) come spiegato dettagliatamente nel capitolo 4, è realizzata dai datalogger Z-GPRS3 tramite un campionamento continuo delle misure provenienti dai sensori sul campo.

I data-logger, tramite le schede SIM e il modem GSM/GPRS di cui sono dotati, effettuano una verifica istantanea di un eventuale superamento di soglia con l'attivazione delle procedure di allerta quali l'invio di un'e-mail e la memorizzazione dell'evento avvenuto.

Gli stessi data-logger memorizzano in locale i dati acquisiti nelle schede SD presenti, gestiscono la trasmissione degli stessi al server centrale (Pc remoto) e permettono di renderli disponibili al gestore. La trasmissione dei dati come file CSV avviene tramite protocollo FTP su rete internet a cadenza prestabilita (ogni 4 ore) ed una serie di programmi dedicati, drivers, provvedono a leggere, elaborare ed archiviare i dati in un sistema DBMS relazionale, nello specifico Microsoft SQL Server, opportunamente configurato per garantire la massima efficienza del sistema, per la creazione automatica di backup (giornaliero/settimanale/mensile) per prevenire perdita dei dati.

I dati ottenuti dal sistema di monitoraggio, una volta trasmessi sul server centrale (pc del laboratorio di Geomatica) possono dunque essere trattati da due tipologie di utenze: il progettista e l'utente finale.

Nel caso del progettista lo stesso potrà intervenire su: (

- Elaborazione o aggiornamento del modello 3D attraverso il software Agisoft Metashape
- Estrazione della geometria dal modello 3d attraverso l'algoritmo Screened Poisson Surface Reconstruction v. 8.0
- Visualizzazione delle misure ottenute dal sistema di trasmissione in formato CSV, o grafico.

- Elaborazione o aggiornamento del modello strutturale integrato (modello “finale”), utilizzando il software di analisi strutturale RFEM della Dublaj.
- Implementazione, addestramento, e messa in funzione della rete neurale sulla piattaforma Tensor Flow in linguaggio Python.
- Visualizzazione dei risultati su piattaforma Word Press

Nel caso dell'utente finale, lo stesso avrà la possibilità di:

- Visualizzare i risultati delle misure ottenute dal sistema di trasmissione in formato CSV
- Visualizzare i risultati su piattaforma Word Press

In relazione alla fase di gestione della fase di previsione e comportamento nel tempo della infrastruttura, si osserva che i dati dei sensori operativi sulla infrastruttura ricevuti dal sistema centrale vengono trasmessi, con la stessa procedura descritta nella fase di Early Warning, al server centrale (pc del laboratorio di Geomatica) dove viene implementato il modello strutturale (integrazione tra modello strutturale e geometrico, assegnazione carichi e sollecitazioni), simulando il comportamento strutturale (da modello) con cedimenti assegnati (nel software) per 1000 scenari differenti e assegnando conseguentemente i differenti livelli di rischio per classi di valore ; 800 di questi risultati vengono poi utilizzati per addestrare una rete neurale (basata sull'algoritmo back-propagation) anch'essa implementata sul pc di laboratorio (server centrale), mentre i restanti 200 vengono utilizzati per testare la bontà dei risultati dell'addestramento della rete neurale implementata introducendo come input esclusivamente gli spostamenti e le rotazioni provenienti dai sensori.

Verificata la corretta risposta della rete neurale, lo stesso sistema implementato è impostato per l'acquisizione automatica dei parametri misurati dai sensori di spostamento. (risulta evidente che più parametri vengono acquisiti e utilizzati per affinare il comportamento della struttura, più realistico sarà il risultato atteso)

Per la fase di visualizzazione (sia per la fase di early warning che per quella di previsione del comportamento strutturale vale lo stesso principio di visualizzazione su piattaforma) e' stata utilizzata una piattaforma di visualizzazione, così come dettagliatamente descritto nel capitolo 4, implementata in ambiente WordPress®, integrando protocolli di sicurezza SSL, che forniscono un livello fondamentale di sicurezza online, essenziale quando si trasmettono informazioni sensibili.

Il valore del sistema proposto sta dunque nella possibilità, da un lato di fornire un valore di allert utile per Early Warning e

dall'altro di valutare, attraverso la tecnica di soft computing (rete neurale) utilizzata, la classe di rischio al variare del tempo predicendo il comportamento della struttura utilizzando esclusivamente in fase di input dati di spostamento (ed utilizzando così solo inizialmente una serie di parametri necessari per l'addestramento iniziale della rete neurale).

Evidenti quindi appaiono i vantaggi in termini di produttività del sistema sia in termini di velocità e semplificazione nei tempi di risposta, sia in termini economici tenendo presente che i dati da acquisire una volta predisposta la condizione iniziale fanno riferimento esclusivamente a dati di spostamento con conseguente vantaggi in termini economici sull'intero sistema.



## 5.1 Casi studio

La sperimentazione della metodologia proposta è stata effettuata su un viadotto autostradale situato sull'Autostrada del Mediterraneo A2 nella città di Reggio Calabria (Fig. 5.5) e su un ponte autostradale che collega Palmi con Gioia Tauro (RC).



Figura 5.5 - Viadotto Annunziata

E' bene sottolineare che il viadotto Autostradale Annunziata può essere considerato come una vera e propria "area studio test" in quanto (data la vicinanza in termini chilometrici con la struttura nella quale opera il Laboratorio di Geomatica) è stata utilizzata più volte dal laboratorio di Geomatica (all'interno del quale ho condotto le mie attività di tesi) come area studio per diverse attività sperimentali comprendenti anche quelle inerenti le attività di monitoraggio e controllo della infrastruttura) portate avanti anche dal sottoscritto e documentate in diversi articoli scientifici.

- Il viadotto, costruito nel 1970 sul fiume "Annunziata", è un viadotto in calcestruzzo armato pre-compresso con 9 campate corte di 27 m, e una lunghezza totale di 254 m (in curva). Il raggio di curvatura è di 150 m e l'altezza media del viadotto è di 25 m s.l.m.

L'infrastruttura, fa parte dell'autostrada A2 ed è gestita da una società pubblico-privata, ANAS S.p.A, trovandosi nel sud Italia, secondo l'INGV italiano (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) risulta essere esposta ad alto rischio sismico. La posizione strategica rende questo viadotto fondamentale per l'intera autostrada, infatti collega la parte nord e sud della città, consentendo la circolazione di veicoli e camion fuori città. In caso di crollo l'intera autostrada sarebbe interrotta con alto rischio e conseguenza sulla circolazione dei veicoli e sulla risposta alle emergenze. Il ponte del viadotto è composto da un modulo standard di 29 m con 4 travi e 3 croci in cemento armato pre-compresso (Fig.5.6).



**Figura 5.6** - Centralina di Controllo- struttura viadotto

L'intera struttura è composta da due ponti (uno per ogni direzione) sostenuti da un paio di pile con una base comune (Fig. 7 a,b). Le pile hanno sezione rettangolare di 2,50 m x 1,60 m e le dimensioni del base delle colonne sono 8 m x 3 m.



**Figura 5.7** - (a) Struttura del viadotto, (b) base delle colonne

- Il Il ponte autostradale che collega Palmi con Gioia Tauro (RC) è anch'esso realizzato in calcestruzzo armato e presenta una lunghezza complessiva di 520 m (figura 5.8). È costituito da sette campate sostenute da sei pile su suolo di categoria C. La vita nominale dell'opera è di 100 anni e si colloca in classe d'uso II.



**Figura 5.8** - Case Study: Road Bridge in Reggio Calabria (between Palmi and Gioia Tauro) South Italy

Nella tabella 5.1 sottostante si riportano le caratteristiche geometriche di campate e pile:

**Tabella 5.1** - principali dimensioni ponte

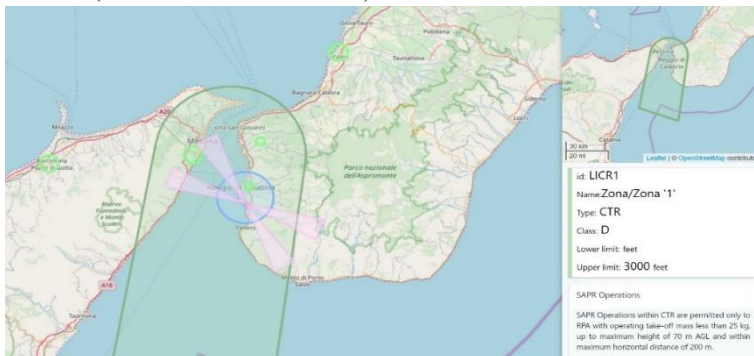
Campata	Luce [m]	Pila	Altezza [m]
1	60	1	3,60
2	80	2	4,70
3	80	3	5,75
4	80	4	7,80
5	80	5	8,80
6	80	6	3,60
7	60		

## 5.2 Rilievo UAV (Modellazione 3d ed estrazione automatica della geometria della infrastruttura)

Il principale Obiettivo della attività di rilievo è consistito nella acquisizione completa del viadotto Annunziata con precisione centimetrica tramite un idoneo rilievo UAV . e la conseguente estrazione delle caratteristiche geometriche della infrastruttura.

Il rilievo metrico del Viadotto Annunziata è stato eseguito nelle prime ore del mattino, con temperatura moderata (18°C) e condizioni tali da evitare che la luce solare fosse diretta nelle immagini acquisite, ottimizzando così le immagini del dataset per il processo di ricostruzione del modello 3d.

Particolare attenzione è stata rivolta alla fase di progettazione del volo e acquisizione delle immagini tenendo presente che la città di Reggio Calabria si trova vicino all'Aeroporto "Tito Minniti"(Fig.5.9), e quindi in ATZ (Aerodrome Traffic Zone).



**Figura 5.9** Spazio controllato per il funzionamento UAV nell'area di rilievo

All'interno dell'ATZ, per il regolamento vigente (aggiornato a gennaio 2019) l'operazione con UAV deve essere autorizzata da ENAC con specifico NOTAM (NOTice To AirMan). Tuttavia, il viadotto Annunziata si trova all'interno di un CTR (Controlled Traffic Region) dove sono consentite operazioni non critiche per UAV con massa di decollo operativa inferiore a 25 kg, fino ad un'altezza massima di 70 m dal livello del suolo (AGL). Il volo visual line of sight (VLOS) è consentito ad una distanza massima di 200 m, con volo manuale o automatico. Nell'area di interesse, per evitare collisioni e delimitare la zona operativa, è stata creata una geo recinzione virtuale tramite app che ha consentito di effettuare le operazioni di rilievo UAV (nell'area dello spazio limitato) in accordo con quanto disposto dal regolamento vigente. Con la limitazione del software, l'UAV ha potuto volare solo all'interno dell'area virtuale (Fig. 5.10).




**Figura 5.10** – Geo-Recinzione intorno al viadotto Annunziata per delimitazione dello spazio aereo per l'indagine.

Lo spazio aereo intorno al viadotto è occupato da edifici a bassa quota e due gru sul lato destro e vegetazione sul lato destro. L'operazione ha tenuto conto della presenza di questi ostacoli. L'altezza del viadotto è di 25 m slm e la l'altezza massima del volo è stata di 70 m slm.

L'indagine aerea è stata eseguita utilizzando un UAV commerciale a quattro rotori di DJI (DJI, Shenzhen, Cina), Mavic Pro, le cui specifiche sono riassunte nella tabella 5.2. Questo UAV a basso costo è portatile fornito sia di GPS che di navigazione a Waypoint con sensori di collisione frontale, che consentono di impostare e caricare un piano di volo per eseguire missioni Waypoint automatiche. La combinazione di queste caratteristiche rende questa piattaforma conforme alla regolamentazione vigente e funzionale al rilievo del viadotto.

**Tabella 5.2-** Caratteristiche DJI Mavic Pro

<b>DJI Mavic Pro Specs</b>	
	
Dimensions	83 x 83 x 198 mm
Weight	734 g
Flight autonomy	27 m
Battery type. capacity	LiPo 3S – 3830 mAh
Operating temperature	0° – 40° C
GNSS system	GPS/GLONASS
Flight accuracy	Vertical +/- 0,1 m Horizontal +/- 0,3 m

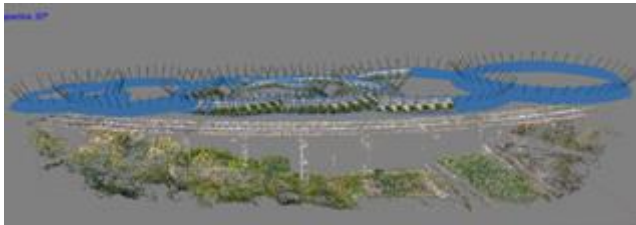
caratteristiche della fotocamera del Mavic Pro sono riportate nella tabella 5.3 seguente:

**Tabella 5.3-** Payload camera sensor

Payload camera specs	
Sensor	Sony 1/2.3" CMOS
Lens	28 mm f/2.2
Real focal length	5 mm
Real sensor width	6.17 mm
Field Of View (FOV)	78,8°
Electronic Shutter Speed	8 s – 1/8000 s
ISO range	100-1600
Image resolution	12.35 MP
Geotagging	Internal built-in GPS

Il primo piano di acquisizione è stato impostato per ottenere un modello 3d a basso dettaglio al fine di utilizzarlo come input per un piano di acquisizione più dettagliato nello spazio 3d. Il piano di acquisizione in ambiente bidimensionale è stato completato ed eseguito utilizzando il software Pix4d (Pix4d Inc).

La prima missione per l'acquisizione dell'area è stata impostata utilizzando 6 diverse missione circolari (per coprire l'intera area) a 50 m a. s. l. con riprese automatiche ogni 5° (per un totale di 72 foto per cerchio) mostrate nella figura 5.11 e riassunte nella tabella 5.4 successiva:



**Figura 5.11–** . Nuvola sparsa di punti di missione circolare elaborata con algoritmo SFM

**Tabella 5.4–** Caratteristiche Missioni Circolari effettuate

Mission	Type	Height (agl)	Time of flight	Camera Yaw	Area (m)
Mission 1	Circular	52 m	5 m : 26 s	45°	89x86
Mission 2	Circular	52 m	5 m : 31 s	45°	89x86
Mission 3	Circular	52 m	5 m : 29 s	45°	89x68
Mission 4	Circular	52 m	5 m : 37 s	45°	82x68
Mission 5	Circular	52 m	5 m : 37 s	45°	82x68
Mission 6	Circular	52 m	4 m : 19 s	30°	55x59

Per ricostruire il modello 3D in scala e georeferirlo, è stato condotto un rilievo utilizzando un GPS Leica GS1250 plus e stazione totale serie Flexline modello TS02-7" dell'area in cui vi erano diversi punti di controllo al suolo (GCP) distribuiti uniformemente sull'area (tab.5.5):

**Tabella 5.5-** Punti di controllo al suolo acquisiti

Point n.	Latitude	Longitude	Altitude
5	38.123166	15.664129	48.039
6	38.123097	15.664128	48.224
7	38.123097	15.664129	70.557
8	38.121631	15.663419	68.445
9	38.123412	15.663525	54.120
10	38.123737	15.664095	58.325

Il modello 3d elaborato, ricostruito con l’algoritmo SFM-MVS, è stato importato nel software UGCS (Universal Ground Control Software) (SPH Engineering, Lettonia) e utilizzato per pianificare una missione specifica per l'acquisizione dettagliata e automatica dell'area (Fig.5.12).



**Figura 5.12–** Modello 3d importato nel software UGCS

Sono state eseguite due diverse missioni di volo laterali per l'acquisizione, in modo da garantire una sovrapposizione dell'80% tra le immagini e un GSD inferiore a 1 (cm /pix). I parametri di missione sono riportati nella tabella 5.6:

**Tabella 5.6 -** Parametri impostati per il volo laterale

Turn type	Stop & Turn
Minimum height [m]	5.00
Maximum height [m]	50.00
Distance to facade [m]	20.00
Camera	Dji Mavic 2 Pro
Forward overlap [%]	40.00
Side overlap [%]	40.00
Pattern	Vertical
Vertical speed [m/s]	2.5
Horizontal speed [m/s]	2.5

L'uso dello strumento di pianificazione voli 3d consente la ripetibilità delle operazioni per eseguire ispezioni e acquisizioni regolari.

Il set di dati fotografici ottenuti (1039 foto, 2,5 gb) è stato elaborato utilizzando il software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, Russia) utilizzando il classico e ormai noto processo di ricostruzione SFM-MVS. Le immagini ottenute, sono state preventivamente ottimizzate per migliorare i contrasti e il rapporto luce/ombra in modo da evidenziarne i dettagli. Dopo il processo di elaborazione, la nuvola di punti sparsi ricostruita consisteva in 46.000 punti mentre la nuvola densa era composta da 32 miliardi di punti. Nella fig. 5.13 è rappresentato il modello 3d ottenuto del ponte autostradale.



**Figure 5.1** - Modello 3d del viadotto Annunziata

Il modello ottenuto è stato utilizzato sia per estrarre informazioni geometriche rilevanti della struttura sia per eseguire un'ispezione virtuale del viadotto.

L'estrazione di informazioni geometriche rilevanti dal modello oggetto dell'indagine è stata eseguita attraverso una metodologia semiautomatica. La procedura utilizzata estrae la forma dalle parti strutturali segmentate e inserisce automaticamente i dati in un foglio di calcolo predefinito. Le parti strutturali già classificate vengono trasformate da nuvola di punti in un oggetto mesh 3d utilizzando Screened Poisson Surface Reconstruction.

Tutti i componenti sono programmati ad hoc. Il principio di base utilizzato è la definizione di due piano di taglio XY e YZ per definire la sezione resistente alla struttura. Il riquadro di delimitazione, come elemento volumetrico attorno all'oggetto, è stato creato in modo da intersecare il piano di taglio all'interno della box dell'oggetto. Successivamente i piani di taglio XY e YZ sono stati configurati in. L'utilizzatore può definire la posizione del piano di taglio in % rispetto all'altezza, alla distanza di offset dal piano di taglio e a un numero totale di piani di taglio, come mostrato nella fig.514:





A parte la costruzione del modello 3D e la conseguente estrazione automatica delle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, le immagini acquisite da drone hanno permesso anche di meglio evidenziare quanto già visibile parzialmente anche ad occhio nudo.

Come si evince dalla figura 5.15 risulta infatti uno stato di degrado diffuso per macchie di umidità e/o efflorescenze, ammaloramento del calcestruzzo e armatura ordinaria scoperta/ossidata degli archi, dei ritti e delle parti a sbalzo degli impalcati; distacco degli spigoli e scopertura delle staffe di cerchiatura, vespai e zone con dilavamento della matrice fino del calcestruzzo. Sulla struttura sono infatti presenti alcune crepe superficiali, segno di mancanza di interventi di manutenzione. Inoltre, le infiltrazioni d'acqua dal ponte alle pile, dovute alla mancanza di una grondaia adeguata, rappresentano un grave problema per la struttura. .



**Figura 5.15**– ammaloramenti sulle pile

A parere dello scrivente, da una prima analisi speditiva, le cause dell'ammaloramento sono riconducibili all'aggressione degli agenti atmosferici e all'inadeguato sistema di allontanamento delle acque meteoriche per l'assenza di pluviali sia a prosecuzione delle bocchette di raccolta sia in corrispondenza dei dieci giunti che interrompono le campate

### 5.3 Il sistema di rilevamento con sensori

Nella presente tesi sono stati utilizzati diversi sensori con un duplice scopo:

- Fornire delle informazioni esclusivamente nella fase iniziale e preliminare del lavoro al fine di conoscere le diverse condizioni di carico della struttura da utilizzarsi in fase preliminare (solo una volta) per modellare analiticamente e strutturalmente la infrastruttura (ponte e viadotto)

- Fornire successivamente valori di spostamento nel tempo su varie parti della struttura al fine di determinare da un lato un sistema di early warning in tempo reale e dall'altro un sistema previsionale dopo elaborazione dei dati acquisiti e dei modelli costruiti con tecniche di soft computing.

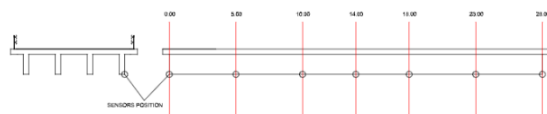
Per la fase previsionale, infatti, al fine di meglio definire il comportamento della struttura sotto indagine, è utile e necessario inserire all'interno del modello strutturale "finale" (integrazione del modello geometrico 3D con il modello strutturale iniziale per come definito nel capitolo 4) costruiti i valori misurati dai sensori di rilevamento opportunamente posizionati sull'opera al fine di avere un modello analitico della infrastruttura.

Nello specifico per modellare analiticamente e numericamente il comportamento strutturale del manufatto, e successivamente realizzare il sistema di monitoraggio predittivo sono stati effettuati dei rilevamenti in loco tramite l'ausilio di diversi sensori, installati su pilastri, travi, e mezzeria delle campate misurando quindi sia spostamenti e rotazioni sia grandezze fisiche, che nel nostro caso si traducono principalmente in tre tipologie di parametri:

1. Sorgenti di carico: ambientale (vento, azione sismica) o artificiale (traffico),
2. risposte strutturali: spostamenti, deformazioni, accelerazioni e inclinazioni,
3. Effetti ambientali: temperatura, precipitazioni, umidità.

Nel particolare sono stati utilizzati 2 coppie di sensori WiseSensing (Datasheet v 2.0) posizionati come in figura 5.16 che integrano al loro interno:

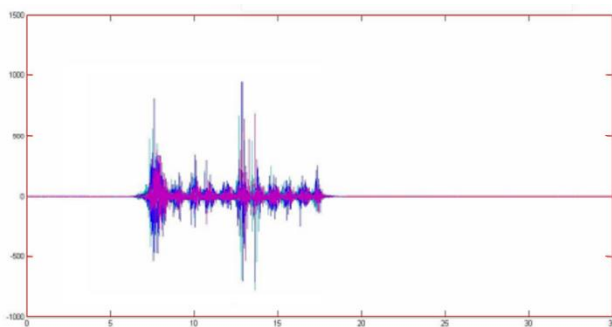
- Sensori di temperatura e umidità: installati rispettivamente per monitorare gradienti di temperatura e d'umidità. Essi sono anche utili per verificare se le grandezze in gioco sono correlate con parametri ambientali, con una sensibilità di  $0,5^{\circ}$  C
- Accelerometri: per acquisire vibrazioni in termini di storie accelerometriche su 3 assi.
- Inclinometri: utilizzati per valutare rotazioni della struttura, e misurare le inclinazioni degli angoli polari delle sezioni cui sono applicati, con sensibilità di 0,02



**Figura 5.16** – disposizione sensori

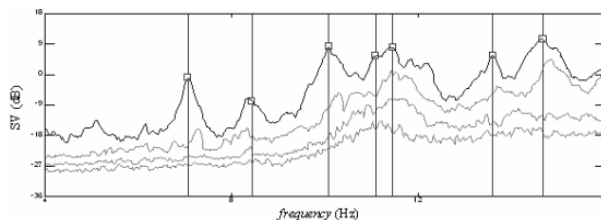
Relativamente ai vari sensori utilizzati ( con riferimento prevalentemente a quelli utilizzati nella fase iniziale e preliminare del lavoro al fine di conoscere le diverse condizioni di carico della struttura ) si riportano di seguito i dati di risposta di alcuni di essi ed alcune brevi considerazioni inerenti il loro utilizzo

In relazione agli accelerometri, in tutte le indagini , la risposta in termini di accelerazione (figura 5.17) è stata calcolata e registrata al passo di  $\Delta t=0,005$  s. Sono state effettuate registrazioni della risposta associata al traffico di durata complessiva dell'ordine di 60 minuti per ogni configurazione di misura.



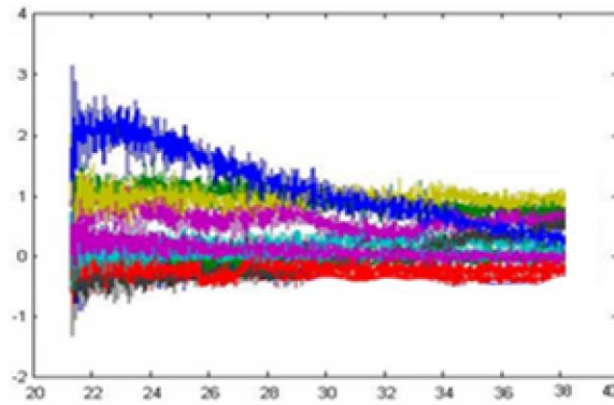
**Figura 5.17** – risultati ottenuti da accelerometro

Un esempio di risultati delle indagini condotte, in termini di frequenze proprie sono invece riassunte in figura 5.18.



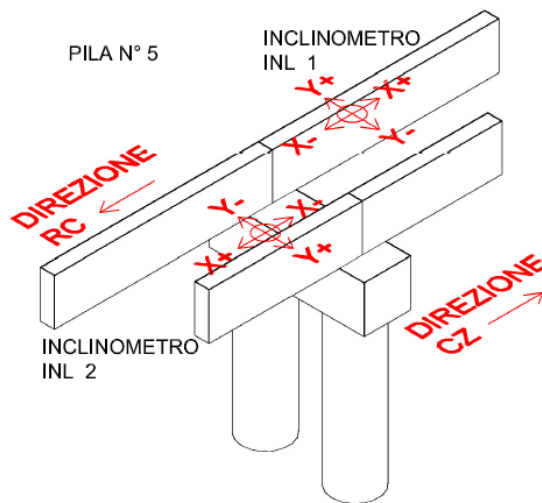
**Figura 5.18** – risultati dell'insieme degli accelerometri in termini di frequenza

In figura 5.19 si riportano invece un esempio dei risultati forniti dall'insieme degli accelerometri relativi alla finestra temporale nella quale è stata effettuata la registrazione necessaria alla valutazione del comportamento della struttura.



**Figura 5.19-** Finestra temporale 22-37 secondi degli accelerogrammi

In relazione alle misure ottenute dagli inclinometri, il cui sistema di riferimento e orientamento utilizzato è riportato in fig. 5.20, sono riportate in tab. 5.8 un esempio dei valori ottenuti e il plottaggio delle stesse (inclinazioni) in un arco di tempo settimanale (figura 5.21 e figura 5.22).



**Figura 5.20 -** sistema di riferimento posizionamento sensori

**Tabella 5.8 -** misure ottenute dagli inclinometri

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Data Orario	(CH-0) INL1X- NS0368 (gradi)	(CH-1) INL1Y- NS0368 (gradi)	(CH-2) INL2X- NS0310 (gradi)	(CH-3) INL2Y- NS0310 (gradi)	(CH-4) INL3X- NS0056 (gradi)	(CH-5) INL3Y- NS0056 (gradi)	(CH-6) INL4X- NS0058 (gradi)	(CH-7) INL4Y- NS0058 (gradi)	(CH-8) INL5X- NS0369 (gradi)	(CH-9) INL5Y- NS0369 (gradi)	(CH-22) Ext_Bat I (VOLT)	(CH-23) BATTE RY (VOLT)	(CH-24) TERMI STOR (DEGR EE)
04/07/2018 17:35	0,034	0,09	-0,02	-0,02	0,013	-0,01	-0,01	-0,024	0,007	-0,024	13,44	3,65	28,5
04/07/2018 17:40	0,008	0,051	-0,02	-0,021	0,013	-0,01	-0,01	-0,024	0,007	-0,024			
04/07/2018 17:45	0,032	0,084	-0,02	-0,021	0,013	-0,011	-0,017	-0,026	0,006	-0,024			
04/07/2018 17:50	0,021	0,047	-0,02	-0,021	0,013	-0,011	-0,008	-0,019	0,006	-0,024			
04/07/2018 17:55	0,014	0,063	-0,021	-0,021	0,013	-0,011	-0,017	-0,027	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:00	0,009	0,046	-0,021	-0,021	0,013	-0,011	-0,017	-0,026	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:05	0,018	0,067	-0,021	-0,028	0,013	-0,011	-0,01	-0,025	0,006	-0,024	13,48	3,65	28,25
04/07/2018 18:10	0,005	0,047	-0,027	-0,029	0,015	-0,011	-0,01	-0,019	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:15	0,006	0,047	-0,026	-0,021	0,013	-0,011	-0,01	-0,019	0,007	-0,024			
04/07/2018 18:20	0,01	0,052	-0,027	-0,022	0,013	-0,011	-0,01	-0,019	0,006	-0,018			
04/07/2018 18:25	0,01	0,046	-0,027	-0,022	0,013	-0,011	-0,008	-0,019	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:30	0,01	0,052	-0,027	-0,022	0,013	-0,011	-0,017	-0,021	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:35	0,013	0,046	-0,027	-0,021	0,013	-0,011	-0,008	-0,019	0,006	-0,024	13,46	3,65	29
04/07/2018 18:40	0,021	0,049	-0,021	-0,022	0,013	-0,011	-0,011	-0,019	0,007	-0,024			
04/07/2018 18:45	0,001	0,05	-0,027	-0,022	0,013	-0,011	-0,01	-0,025	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:50	0,027	0,077	-0,027	-0,022	0,013	-0,012	-0,017	-0,021	0,006	-0,024			
04/07/2018 18:55	0,009	0,056	-0,027	-0,022	0,013	-0,012	-0,017	-0,027	0,007	-0,024			
04/07/2018 19:00	0,008	0,055	-0,027	-0,022	0,012	-0,012	-0,017	-0,022	0,006	-0,025			
04/07/2018 19:05	0,005	0,082	-0,028	-0,022	0,012	-0,012	-0,012	-0,02	0,005	-0,02	13,47	3,65	29,25
04/07/2018 19:10	0,009	0,046	-0,028	-0,023	0,012	-0,012	-0,018	-0,028	0,005	-0,025			
04/07/2018 19:15	0,008	0,043	-0,023	-0,024	0,011	-0,013	-0,019	-0,024	0,006	-0,025			

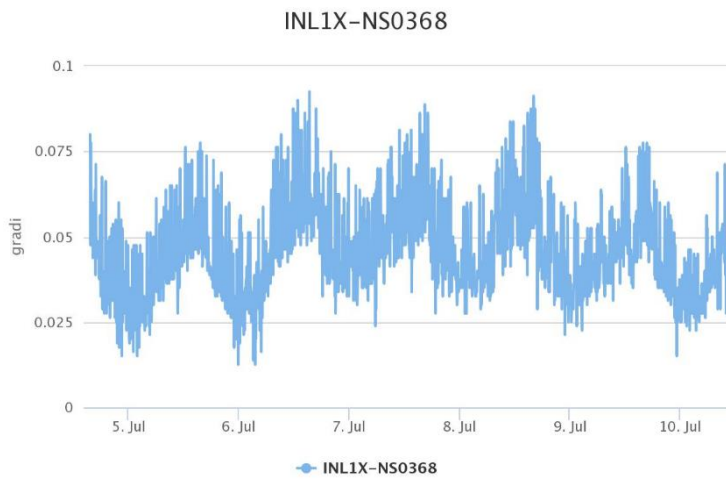


Figura 5.21 - plottaggio valori inclinometrici lungo x rilevati da uno dei sensori installati.

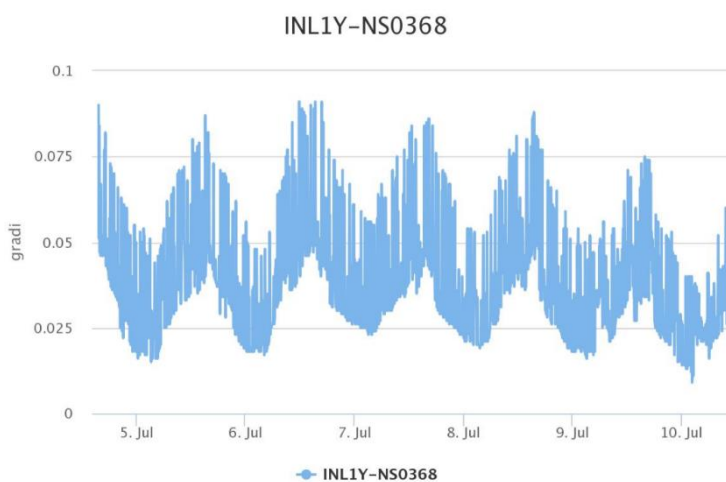


Figura 5.22 - plottaggio valori inclinometrici lungo y rilevati da uno dei sensori installati.

In relazione ai risultati prodotti dal sensore di temperatura si riporta in figura 5.23, sempre a titolo di esempio l'andamento delle temperature registrate nell'arco temporale di una settimana.



**Figura 5.23** - plottaggio andamento settimanale valori di temperatura

Relativamente ai sensori utilizzati (con riferimento a quelli utilizzati per determinare i valori di spostamento nel tempo su varie parti della struttura al fine di determinare Early Warning e studio previsionale del comportamento della infrastruttura nel tempo) si riporta di seguito l'elenco della strumentazione e delle metodologie utilizzate (valutando la produttività in termini sia di precisione che di costi per ciascuno di essi)

Sono state dunque utilizzate le seguenti strumentazioni e metodologie di acquisizione

- un ricevitore LEICA-GMX30 (Firmware VADASE) con antenna (codice e fase L1 / L2 a 24 canali, velocità dati 20 Hz, tecnologia Smart Track per elevata precessione, precisione di 1 mm + 0,5 ppm (orizz.), 2 mm + 1 ppm (ver. ))
- Una rete di 9 sensori GNSS (utilizzati soprattutto per monitorare i cedimenti e gli spostamenti dei giunti) composta da sensori GNSS low cost (costituiti da coppie di ricevitori a singola frequenza, u-blox C94-M8P, associati ad un'antenna Trimble bullet 360) e ad un ricevitore di classe geodetica a doppia frequenza il Leica GM30 GNSS;
- Due ricevitori GPS Leica-1250 (codice e fase L1 / L2 a 16 canali, velocità dati 20 Hz, tecnologia Smart Track, precisione di 1 mm + 0,5 ppm (orizz.), 2 mm + 1 ppm (ver. )) utilizzati in modalità prevalentemente statica relativa e con una stazione totale serie Flexline modello TS02-7"

Il primo sistema (VADASE) e' sicuramente un sistema di controllo certamente performante in termini di precisione ma di certo molto dispendioso in termini economici.

il secondo sistema (Low Cost) sicuramente piu' economico e sulla carta meno performante in termini di precisioni assolute richiede l'utilizzo di metodi di elaborazione al fine di simulare il comportamento della frequenza L2 (in relazione alle precisioni richieste e' necessario infatti ricostruire la frequenza L2 in modo sintentico (vedi capitolo 4)). Tale ricostruzione tiene conto oltre che del ricevitore di classe

geodetica anche della posizione di installazione dei vari sensori per correggere le misure effettuate. In tal modo risulta possibile verificare e correggere la misura ottenuta da ogni sensore utilizzando per verifica la posizione degli altri. Nel particolare è stato utilizzato come asse x il senso di marcia Reggio- Salerno, l'asse y il verso mare monte, e l'asse z lo sviluppo in altezza con segno positivo verso l'alto.

il terzo (sistema statico relativo e stazione totale), e' un sistema noto e collaudato da tempo ed e' stato prevalentemente utilizzato per verificare i dati ottenuti dai sensori attraverso delle acquisizioni ripetute nel tempo (Nel particolare si è proceduto nel posizionare 2 dei 9 sensori nelle campate in prossimità delle spalle, dove risulta agevole la misurazione anche attraverso la strumentazione GPS base rover, rilevando i rimanenti attraverso l'ausilio di stazione totale e "vetrini" posizionati in corrispondenza del sensore

In una prima fase si è dunque proceduto nel verificare i risultati ottenuti con le tre metodologie, ponendo particolare attenzione a quelli ottenuti tramite il sistema low cost a singola frequenza (dove maggiore e ' stata la fase di attivita' sperimentale al fine di rendere utilizzabili in termine di precisione i risultati ottenibili dalla metodologia)utilizzando come riferimento per la validazione dei rimanenti sistemi di monitoraggio il sistema a doppia frequenza in modalita' statica relativa e la stazione totale

Si riportano in figura 5.24 e 5.25 i valori ottenuti dal monitoraggio tramite GPS base Rover e stazione totale .

27	Quota media	Precisione lineare	Precisione angolare	Est media			
28	0	GPS Leica 1250		-66/10			
29							
30	Tipo aggiornamento		Note				
31			NOTA:				
32							
33							
35	GNSS - RIGHE B e R						
39	Stazione GPS:	100 -	PDCP-1				
44	X:	4837445.79	Y:	1356336.11			
47	Z:	5996374.54	H centro antenna:	1.00			
47	Tipo ricevitore:	DOPPIA FREQUENZA	Metodologia di rilievo:	RTK			
51	Inizio osservazioni:	09/03/2018	Fine osservazioni:	09/03/2018			
54							
55	Nome punto	H	DX	DY	DZ	DOP	Materializzazione
58	PF090440REGGIO DI	5,00	20,936	-341,754	98,341	1	SPIG S-DI FABBR PART 54
61	104	3,50	21,629	-341,622	95,017	1	SPIG RECINZIONE
64	105	3,55	15,659	-214,169	40,978	1	STRADA
67	106	3,55	12,196	-205,665	42,457	1	STRADA
70	107	3,55	4,656	-190,290	46,307	1	STRADA
73	108	3,55	5,665	-188,191	44,087	1	STRADA
76	109	3,55	4,332	-193,702	44,308	1	STRADA
79	110	3,55	1,638	-190,907	46,328	1	STRADA
82	111	3,55	1,235	-177,659	45,996	1	STRADA
85	112	3,55	-0,188	-164,397	43,245	1	STRADA
88	113	3,55	-6,430	-151,959	46,837	1	STRADA
91	114	3,55	-10,601	-148,702	50,914	1	STRADA
94	115	5,00	-11,636	-144,350	53,069	1	STRADA
97	116	5,00	-9,787	-143,179	50,445	1	STRADA
100	117	5,00	-10,522	-141,368	50,724	1	STRADA
103	118	5,00	-11,660	-137,541	50,804	1	STRADA
106	119	5,00	-12,112	-135,216	50,640	1	STRADA
109	120	5,00	-14,734	-131,496	52,577	1	STRADA
112	121	5,00	-14,376	-123,108	49,415	1	STRADA
115	122	5,00	-18,249	-114,606	51,243	1	STRADA
118	123	5,00	-15,926	-114,656	48,442	1	STRADA
121	124	5,00	-15,935	-111,988	47,583	1	STRADA

Figura 5.24 - Acquisizione dati con GPs Leica 1250



P6a		P6a		P6a	
Coordinate E	Data	Coordinate N	Data	Coordinate H	Data
0,0000	07/01/2018 17:09	0,0000	07/01/2018 17:09	0,0000	07/01/2018 17:09
-0,0003	07/01/2018 18:08	-0,0002	07/01/2018 18:08	0,0001	07/01/2018 18:08
-0,0004	07/01/2018 19:10	-0,0001	07/01/2018 19:10	0,0001	07/01/2018 19:10
-0,0002	07/01/2018 20:05	0,0001	07/01/2018 20:05	0,0002	07/01/2018 20:05
-0,0004	07/01/2018 21:37	0,0001	07/01/2018 21:37	0,0004	07/01/2018 21:37
-0,0003	07/01/2018 22:37	0,0002	07/01/2018 22:37	0,0002	07/01/2018 22:37
-0,0002	07/01/2018 23:14	0,0003	07/01/2018 23:14	0,0003	07/01/2018 23:14
-0,0002	07/01/2018 23:14	0,0003	07/01/2018 23:14	0,0003	07/01/2018 23:14
-0,0002	07/02/2018 00:23	0,0004	07/02/2018 00:23	0,0002	07/02/2018 00:23
-0,0003	07/02/2018 01:14	0,0004	07/02/2018 01:14	0,0003	07/02/2018 01:14
-0,0001	07/02/2018 02:10	0,0004	07/02/2018 02:10	0,0004	07/02/2018 02:10
0,0000	07/02/2018 03:18	0,0005	07/02/2018 03:18	0,0007	07/02/2018 03:18
-0,0003	07/02/2018 05:30	0,0005	07/02/2018 05:30	0,0002	07/02/2018 05:30
0,0000	07/02/2018 07:54	0,0001	07/02/2018 07:54	0,0000	07/02/2018 07:54
0,0000	07/02/2018 09:05	0,0001	07/02/2018 09:05	-0,0004	07/02/2018 09:05
-0,0005	07/03/2018 16:35	0,0000	07/03/2018 16:35	-0,0009	07/03/2018 16:35
-0,0009	07/03/2018 18:10	0,0001	07/03/2018 18:10	-0,0008	07/03/2018 18:10
-0,0008	07/03/2018 19:26	0,0002	07/03/2018 19:26	-0,0007	07/03/2018 19:26
-0,0008	07/03/2018 20:21	0,0002	07/03/2018 20:21	-0,0008	07/03/2018 20:21
-0,0007	07/04/2018 18:16	0,0001	07/04/2018 18:16	-0,0012	07/04/2018 18:16
-0,0008	07/04/2018 19:35	0,0001	07/04/2018 19:35	-0,0011	07/04/2018 19:35
-0,0009	07/04/2018 20:16	0,0002	07/04/2018 20:16	-0,0012	07/04/2018 20:16
-0,0004	07/06/2018 15:24	-0,0002	07/06/2018 15:24	-0,0024	07/06/2018 15:24
-0,0007	07/06/2018 16:11	-0,0002	07/06/2018 16:11	-0,0021	07/06/2018 16:11
-0,0005	07/06/2018 17:41	-0,0001	07/06/2018 17:41	-0,0020	07/06/2018 17:41
-0,0007	07/06/2018 18:52	0,0001	07/06/2018 18:52	-0,0020	07/06/2018 18:52
-0,0009	07/06/2018 19:35	0,0001	07/06/2018 19:35	-0,0020	07/06/2018 19:35

Figura 5.25 - esempi misure report prima

L'efficacia del sistema e la bontà delle misure ottenute dai sensori low cost, è stata quindi valutata in termini di ripetibilità e precisione delle misure ( $\sigma$  e  $\delta$ ).

Disponendo di un dataset consistente si è voluto indagare la precisione ottenibile da tali apparati non solo su finestre temporali di 24 ore, che dovrebbero consentire di raggiungere precisioni migliori, ma anche su intervalli temporali più brevi. Tale scelta si giustifica principalmente col fatto che riducendo la lunghezza della finestra temporale sarebbe possibile disporre di più posizioni all'interno della stessa giornata e quindi aumentare la frequenza di monitoraggio.

In figura 5.26 e 5.27 è riportato un grafico di controllo dei risultati ottenuti in termini di confronto dove si riporta in funzione del tempo la variazione della posizione di uno stesso punto rilevato con metodologie differenti.

Nell'altro invece riporto in funzione dei diversi punti di misura la precisione di posizionamento.

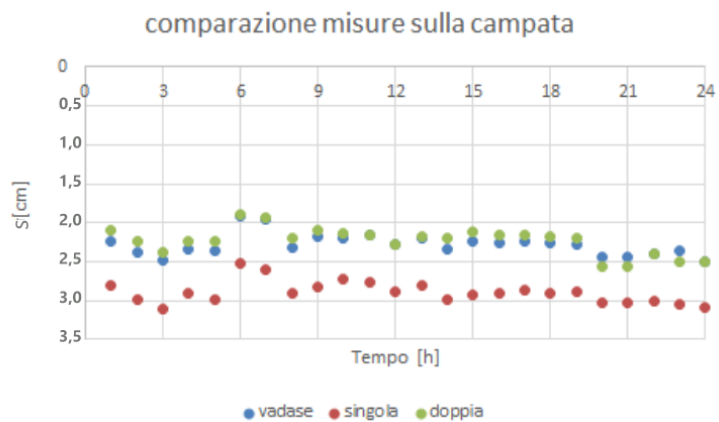
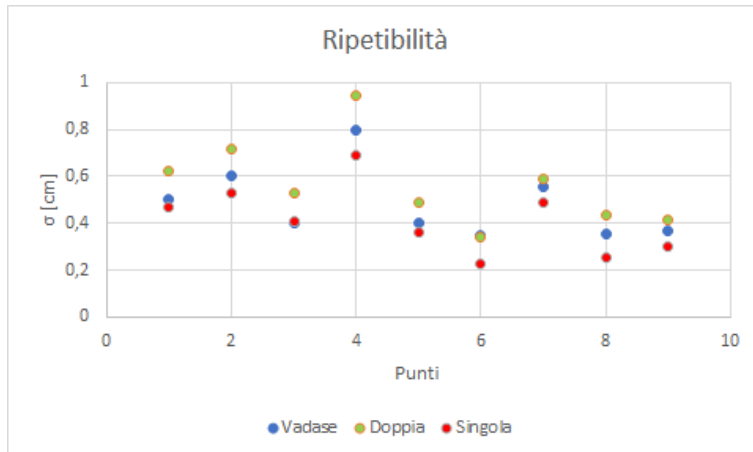
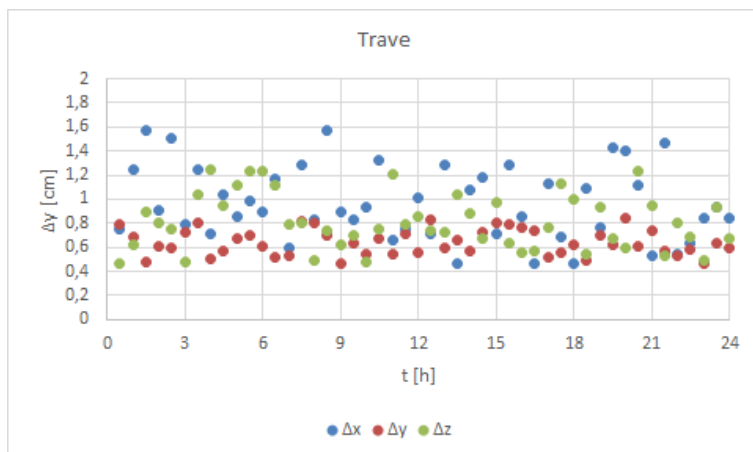


Figura 5.26 - variazione della posizione di un punto rilevato con le diverse metodologie



**Figura 5.27** - precisione di posizionamento in funzione dei diversi punti di misura.

Valutata dunque la ottima risposta (come ampiamente atteso) da parte del sistema a doppia frequenza (Vadase) e la altrettanto soddisfacente risposta (successiva alle implementazioni fatte per renderla performante per la presente applicazione in termini di precisioni) del sistema low cost, si e' deciso di utilizzare (per ovvi motivi economici e data la attivita' ad oggi esclusivamente sperimentale della metodologiaproposta nella presente tesi) prevalentemente i sistemi di tipo low cost. In Figura 5.28 si riportano dunque (a titolo di esempio) gli spostamenti (Delta x - Delta y - Delta z) ottenuti nel tempo (nell'arco delle 24 ore) su un pilastro e su un punt posizionato sulla campata centrale (fig. 5.29) e su un punto posizionato sulla pila (fig. 5.30) di cui si riporta solo il Delta y.



**Figura 5.28** - Risultati monitoraggio trave

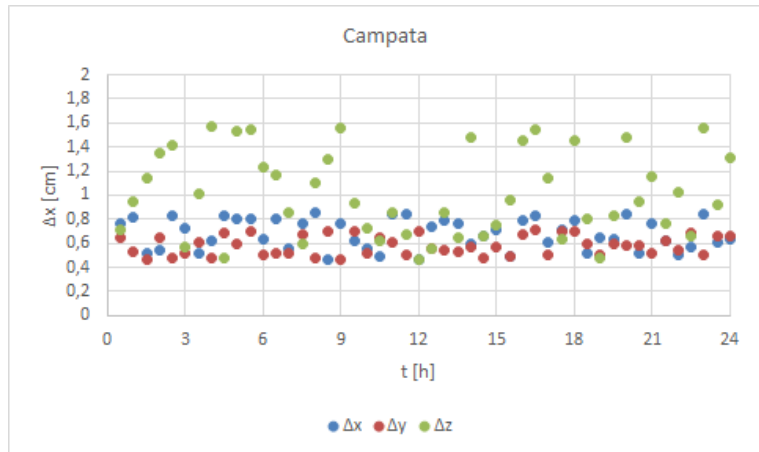


Figura 5.29 - Risultati monitoraggio Campata

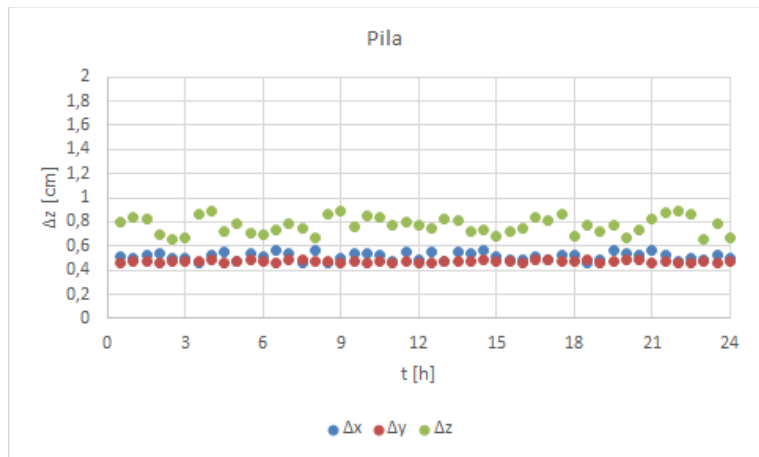


Figura 5.30 - Risultati monitoraggio Pila

Ovviamente i dati acquisiti in forma tabellare ad intervalli di tempo preimpostati, sono consultabili anche da postazione remota da chiunque sia in possesso delle credenziali d'accesso al sistema, e vengono elaborati ed interpretati su vari grafici che riportano per ogni sensore la variazione nel tempo della grandezza d'interesse, dando così la possibilità di valutare eventuali anomalie.

A titolo di esempio si riportano i dati ottenuti dal sistema low cost (fig.5.31)

	S1		S2		S3		S4		S5								
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y							
11/07/2019 11:20	1.595924	0.855035	1.033496	1.138562	1.010279	0.621619	1.349601	0.850914	1.620925	1.606782	1.180336	1.707587	0.740632	0.671015	1.024227	0.956889	1.8
11/07/2020 11:25	1.436167	1.507159	1.149494	1.365168	1.813406	1.436374	1.543102	1.713736	1.526874	1.090114	1.060462	1.76375	1.450269	1.566687	0.67071	0.98308	1.3
11/07/2021 11:30	0.939854	1.357203	0.689229	0.572025	1.423991	1.846515	1.002857	0.681321	1.27682	1.469325	0.828988	0.794975	1.710410	0.674021	1.246779	1.571272	1.8
11/07/2022 11:35	0.829675	1.290675	1.515878	1.65751	1.475424	1.73558	1.843531	1.554684	1.288587	0.675223	1.589986	1.08857	1.355016	0.812139	1.529281	1.233947	1.3
11/07/2023 11:40	1.794932	1.700711	1.709585	0.821627	1.755088	0.970673	0.829971	1.62988	1.620063	1.668745	1.782475	1.460024	0.957883	1.490493	0.893585	1.041134	1.3
11/07/2024 11:45	0.797759	1.84157	0.968156	0.805478	1.355867	0.836175	1.64491	1.070312	1.620145	1.721252	1.537107	1.758877	1.458905	0.813966	1.851336	0.834652	0.7
11/07/2025 11:50	0.91507	1.734664	1.437054	1.567857	0.713763	0.629543	0.731359	1.109198	1.338534	1.479613	1.779422	0.712562	0.603369	0.714475	1.27123	1.380929	1.5
11/07/2026 11:55	1.09126	1.780307	1.822332	0.709177	1.369241	0.849107	0.629662	1.451566	0.846799	1.437357	1.688102	1.386663	1.17431	0.944671	1.592895	1.427881	0.8
11/07/2027 12:00	1.771012	1.023482	0.880449	0.607619	0.777347	0.957287	1.482281	1.676725	0.621026	1.760806	1.529555	1.347498	1.48974	0.898184	1.030201	0.960605	1.6
11/07/2028 12:05	1.839352	0.750726	1.5442	1.214067	1.500929	0.701018	1.754711	1.707256	0.665726	1.752687	0.658709	0.752677	1.508201	0.928357	1.831004	0.979973	1.7
11/07/2029 12:10	1.737124	0.706045	1.062519	0.955558	1.198099	1.358768	0.655148	1.239908	0.62408	0.817251	1.51344	0.887048	0.750467	1.697727	1.527741	1.194893	1.4
11/07/2030 12:15	1.651802	1.594946	1.356022	1.246828	1.767541	1.484522	1.791346	1.534271	1.837908	1.554215	0.978919	1.177811	0.703907	1.07118	0.950483	1.650646	1.5
11/07/2031 12:20	0.979213	1.630899	1.222148	1.846103	1.79748	1.335885	1.512046	0.982642	0.765416	0.952693	1.153809	0.833518	1.491983	1.800589	0.74819	1.305809	1.6
11/07/2032 12:25	1.43396	0.788494	1.115579	1.393049	1.621622	1.786885	0.956699	0.772774	1.430282	1.091977	0.9599	0.750009	1.098875	0.802282	0.69325	1.427932	1.4
11/07/2033 12:30	1.856647	1.442517	1.986395	1.625869	0.987343	1.466707	1.505629	0.618709	0.974468	1.189568	1.033864	1.550885	1.29838	0.928201	1.798392	1.526973	0.9
11/07/2034 12:35	1.51084	1.069405	1.703766	0.751348	0.657129	1.737518	1.274442	1.687873	0.952109	1.74612	1.740818	0.699159	1.029571	1.408759	1.407625	1.441298	1.4
11/07/2035 12:40	1.898677	1.780818	1.168788	1.063705	1.529976	1.6238	0.808537	1.61648	1.508801	1.425837	1.531961	1.572855	0.644738	0.734006	1.72592	0.800547	1.0
11/07/2036 12:45	1.770173	0.731569	1.442711	0.765598	1.197388	1.329382	1.112339	1.395076	1.17657	1.198618	0.745937	1.153612	1.471178	0.693807	1.283245	1.49671	1.5
11/07/2037 12:50	1.297562	1.364373	1.105503	0.737045	1.231412	1.833967	1.80049	1.851182	0.868277	1.470005	0.762304	0.705752	1.803432	1.349342	1.159811	1.999074	1.0
11/07/2038 12:55	0.655862	1.194296	1.255944	1.247234	1.289748	1.347645	1.213796	1.103383	0.74144	1.841819	0.800205	1.646781	0.605004	0.780808	0.659732	1.800646	0.6
11/07/2039 13:00	1.959897	1.229971	0.999158	1.511912	1.713037	1.414916	1.792861	0.971831	0.962382	0.598671	1.002053	0.63417	1.736974	0.616566	1.146935	0.855307	1.8
11/07/2040 13:05	1.73226	1.698451	1.081076	1.376765	1.689431	1.434955	1.583018	1.45138	0.979173	1.064311	1.54481	1.159367	0.570577	1.488668	1.480982	1.80032	1.4
11/07/2041 13:10	1.457392	0.704655	1.213085	0.890654	1.797047	0.647371	1.137507	1.516746	1.675242	0.959942	1.250444	1.34228	0.89723	0.828949	0.616666	0.7	
11/07/2042 13:15	0.702307	0.944394	0.969126	1.336940	0.700146	1.138997	1.262067	1.212442	0.59784	1.104564	1.800591	0.686054	1.651203	1.640654	1.283796	0.752028	1.1
11/07/2043 13:20	0.593791	0.650627	1.161116	1.358526	1.363145	1.154689	1.443679	1.349415	0.819462	1.179307	1.821889	1.452273	0.909064	0.940254	1.137383	1.413676	0.6
11/07/2044 13:25	0.668717	0.730451	1.414738	1.628278	1.393935	1.460984	0.921556	1.517541	0.931884	0.763548	1.792135	0.644781	1.107486	0.90641	0.688313	0.90641	1.7

Figura 5.31 - Dati di monitoraggio da sensori low cost.

#### 5.4 Modello Strutturale e Modellazione 3d per la produzione di un Modello “Finale”

Al fine di avere un modello iniziale con cui poter addestrare la rete neurale e procedere quindi con la fase di previsione del comportamento della infrastruttura nel tempo si è così proceduto:

- Acquisizione di geometria e particolari costruttivi da rilievo e modellazione 3D da Drone;
- Acquisizione delle informazioni relative alle proprietà meccaniche dei materiali e dei terreni attraverso la documentazione di progetto;
- Acquisizione dei “carichi” tramite sistema di sensori installati in loco
- Creazione del modello strutturale finale tramite FEM

È bene a tal proposito ricordare che, estratte le caratteristiche geometriche dal modello 3d, poiché non si conosce a priori il comportamento dell’infrastruttura (struttura già esistente) è necessario effettuare una modellazione strutturale (assegnando la geometria estratta dal modello 3D) in modo tale da avere appunto un un modello iniziale con cui poter addestrare la rete neurale.

A tal proposito, la prima fase è consistita nella estrazione delle caratteristiche geometriche del ponte come spiegato in dettaglio nel paragrafo 5.2

Si riporta in fig. 5.32 il modello 3d e alcune delle caratteristiche geometriche estratte (fig. 5.33 e tab. 5.8)



Figura 5.32 - Modello 3d del viadotto Annunziata

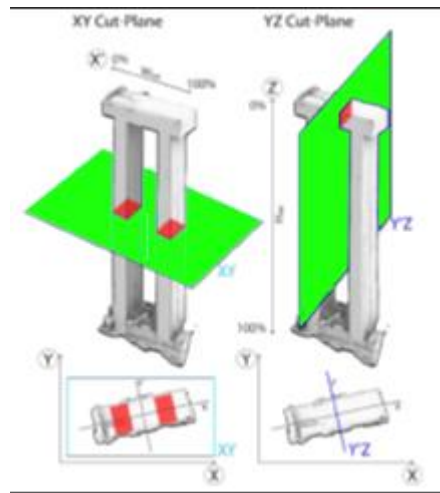


Figura 5.33 - sistema di estrazione caratteristiche geometriche SE

Tabella 5.8 - Database Geometrie estratte

Base	base (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
	altezza (m)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Travi longitudinali	lunghezza (m)	27	27	27	27	27	27	27	27
	ampiezza (m)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	altezza (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	N	4	4	4	4	4	4	4	4
Travi traverse	Lenght (m)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
	base (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	height (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	N	3	3	3	3	3	3	3	3

Successivamente bisogna definire la tipologia di modello strutturale da utilizzare.

A tal proposito è necessario definire gli elementi strutturali che compongono il ponte oggetto di studio discretizzandoli per passare dalla struttura reale e quella idealizzata o approssimata per la quale è possibile applicare il metodo degli elementi finiti al fine di ottenere una soluzione ingegneristica del problema.

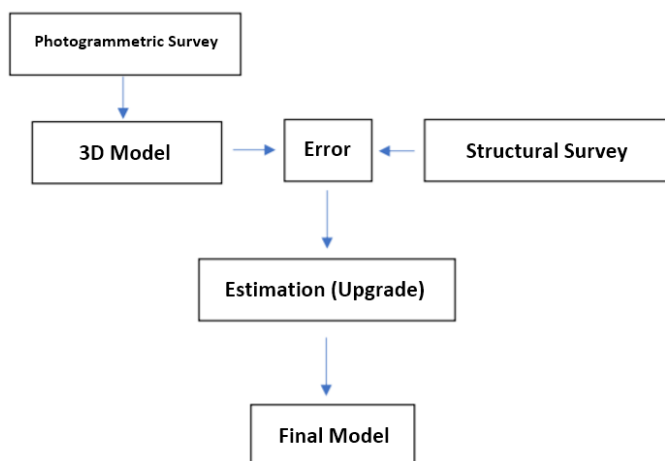
Nel nostro caso, essendo un primo prototipo (non essendo fondamentale quindi per questa sperimentazione il “dettaglio” strutturale dell’opera) si è proceduto ad una discretizzazione tridimensionale che è stata condotta utilizzando elementi guscio (shell) ed elementi trave (beam), mentre il terreno è stato discretizzato mediante l’utilizzo di elementi molla (spring) a comportamento elastico e lineare in accordo alla teoria della trave su suolo elastico di Winkler.

Corre comunque l'obbligo di ricordare e sottolineare che il livello di approfondimento del modello dipende dalla documentazione disponibile e dalla qualità ed estensione delle indagini che vengono svolte relativamente alle seguenti caratteristiche:

- la geometria e i particolari costruttivi;
- le proprietà meccaniche dei materiali e dei terreni;
- i carichi permanenti.

Nel nostro caso è stato adottato un fattore di confidenza pari ad 1.00 come stabilito dall'attuale Norma Tecnica per le Costruzioni NTC 2018 (progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca + limitate verifiche in sito)

A questo punto utilizzando il software RFEM si è proceduto all'inserimento delle caratteristiche geometriche estratte dal modello 3d all'interno del modello strutturale secondo quanto evidenziato in figura 5.34.



**Figura 5.34** - flowchart integrazione modelli e addestramento rete neurale

Per la modellazione strutturale è stato appunto utilizzato il programma di analisi strutturale agli elementi finiti RFEM. Software usato per definire strutture, materiali e carichi di sistemi strutturali piani e spaziali costituiti da piastre, pareti, gusci, aste. Il programma consente anche di creare strutture combinate, solidi ed elementi di contatto. RFEM determina le forze interne, gli spostamenti generalizzati e le reazioni vincolari, ed i coefficienti del suolo.

Per ottenere il modello strutturale “finale” (integrazione del modello 3d e dei carichi applicati alla infrastruttura) è necessario appunto definire ed individuare la tipologia ed il valore dei carichi da inserire nel FEM. A tal proposito:

- al fine di acquisire le informazioni relative alle proprietà meccaniche dei materiali e dei terreni attraverso la documentazione di progetto); si è proceduto utilizzando il "mechanistic model" che permette di determinare la microrisposta della struttura, causata dalle azioni dei carichi e dalle condizioni ambientali, fornendo così un parametro da inserire nel modello Fem
- al fine di acquisire informazioni sui carichi tramite sistema di sensori installati in loco sono stati considerati
  - Gli effetti del vento
  - la portata d'acqua sulle pile
  - il traffico giornaliero medio
  - i parametri di deterioramento dei materiali

Nel particolare per gli effetti del vento della portata e del traffico giornaliero medio sono state utilizzate le classiche formule standard di calcolo, per determinare il valore.

Di seguito, a titolo esplicativo si riportano i parametri (i cui valori vengono imposti come da normativa per alcuni di essi e rilevati per gli altri che risultano invece variabili nel tempo) costituenti il dataset implementato per la costruzione del modello strutturale.

**Tabella 5.9 - Valore dei carichi agenti sulla infrastruttura**

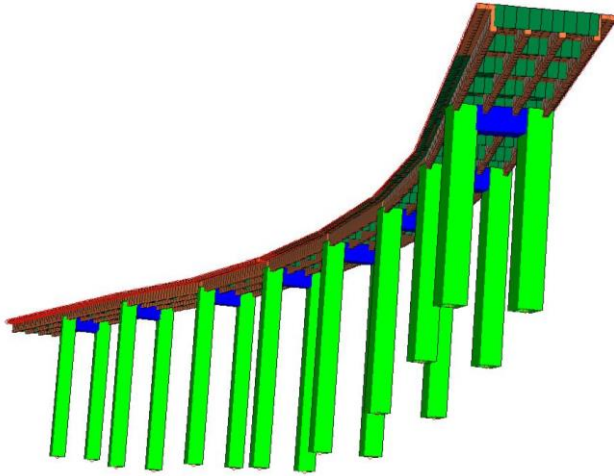
Wind	$F_x=18.312$ kN/m	$F_y= 14.856$ kN/m	$M_z= 202.478$ kNm/m
Traffic	$Q= 300$ kN/m	$q=9\text{kN/m}^2$	TGM= 8659
Flow	$Q_{in}=180$ $\text{m}^3/\text{s}$	$Q_e=0$	$R= R(\text{kN}) = 2483,17$
deterioration	Low=1,1	Medium=1	Alto 0,8

È bene, infatti, osservare che al fine di creare un modello predittivo è necessario conoscere la risposta del modello strutturale sottoposto a diverse azioni di carico sull'infrastruttura

A tal proposito nella presente sperimentazione, per creare un modello strutturale variabile nel tempo, sono stati presi in considerazione differenti scenari facendo variare le combinazioni dei parametri relativi ai carichi agenti sulla infrastruttura (o da normativa o nelle condizioni più critiche, tab. 5.9) in modo ottenere valori di cedimenti e corrispondenti classi di rischio.

Seguendo dunque le varie fasi sopra descritte, si è ottenuto un modello finale (integrato con la geometria), riportato in fig. 5.35 che ci permette di analizzare il comportamento della infrastruttura cambiando i carichi applicati di cui detto precedentemente e consentendo inoltre l'addestramento di una rete neurale sperimentale predittiva

opportunamente implementata al fine di conoscere il comportamento predittivo nel tempo relativo all'infrastruttura esaminata.



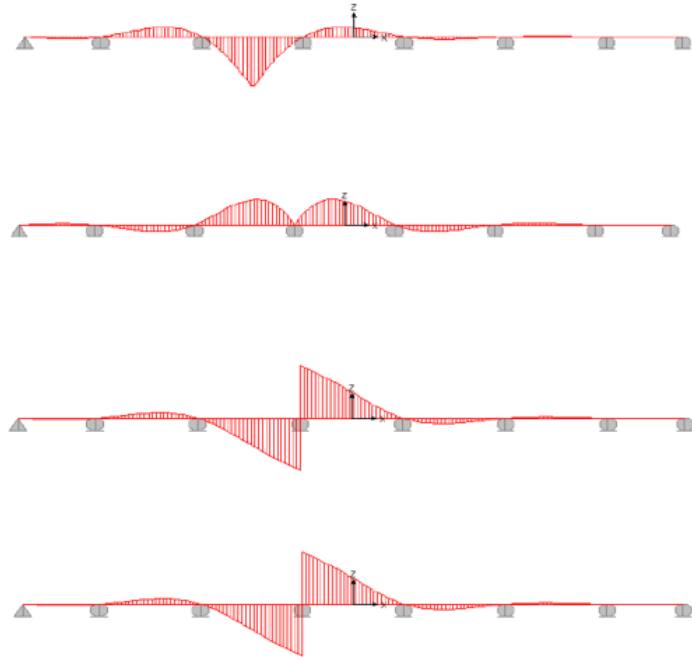
**Figure 5.35** – Modello finale (integrato con la geometria) del viadotto agli elementi finiti

Sono state dunque effettuate un migliaio di simulazioni, ottenendo da un lato i parametri necessari all'addestramento della rete neurale, e dall'altro verificando quale fosse la campata maggiormente soggetta a sollecitazioni sulla quale installare i sensori di spostamento qualora non vi fossero abbastanza risorse (economiche) per un monitoraggio completo.

Dall'esame effettuato è risultato che la campata più soggetta alle sollecitazioni è la campata 4.

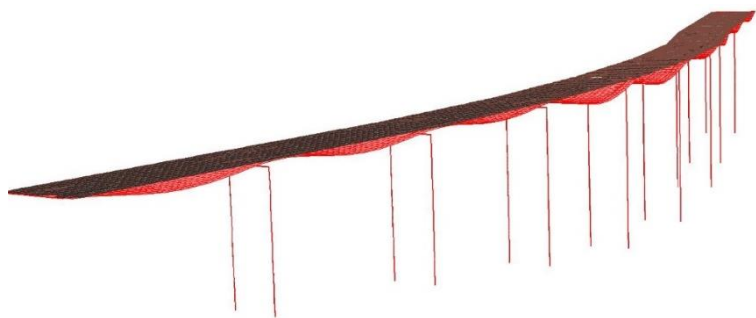


Di seguito in fig. 5.36 si riportano dunque i risultati relativi a taglio e momento sulle pile e sull'impalcato della campata più sollecitata

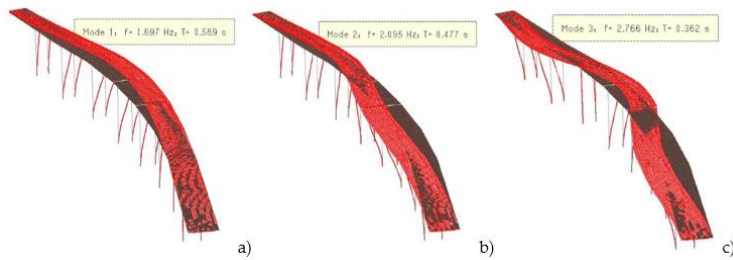


**Figura 5.36** - valore di massimo momento a) nella campata b) nel pilastro; valore di taglio massimo c) nella campata e d) nel pilastro

Il risultato ottenuto dall'analisi statica è confermato anche dall'analisi dinamica, infatti, come si può osservare dalla figura 5.37, la stessa campata (4) è quella soggetta sia a spostamenti verticali maggiori (sotto carichi veicolari) sia quella che risente di più del comportamento vibrazionale (vedi fig. 5.38).



**Figure 5.37** – Modello FE del viadotto, spostamenti verticali sotto carico veicolare statico



**Figure 5.38** – Modello FE del viadotto a) primo modello vibrazionale b) secondo modello vibrazionale c) terzo modello vibrazionale

- Calcolo valori soglia

Una volta costruito il modello “finale” sullo stesso, sono stati quindi processati mille differenti scenari facendo variare le combinazioni dei parametri relativi ai carichi agenti sulla infrastruttura in modo da ottenere valori di cedimenti e corrispondenti classi di rischio.

In funzione delle diverse elaborazioni del software sono state dunque individuate quattro classi di rischio:

Classe A: Trascurabile. Infrastrutture che non manifestano segni o difetti significativi, (sul Foglio di Calcolo si visualizzano tutti gli elementi con colorazione verde).

Classe B: Bassa. Infrastrutture che manifestano alcuni elementi con lievi difetti. (in piattaforma si visualizzano alcuni elementi con colorazione gialla).

Classe C: Moderata. Le infrastrutture appartenenti a questa classe manifestano elementi con difetti significativi (in piattaforma si visualizzano alcuni elementi con colorazione arancio).

Classe D: Elevata, Le infrastrutture appartenenti a questa classe manifestano elementi con difetti significativi (in piattaforma si visualizzano alcuni elementi con colorazione rossa).

Al fine quindi di utilizzare il sistema sperimentato e proposto con finalita' di Early warning, una volta ottenute e' definite le classi di rischio e dunque prefissati i valori soglia, il sistema è stato programmato in modo tale che il valore soglia venga “banalmente” confrontato con il valore misurato da sensore (inviato dalla centralina al sistema centrale di elaborazione costituito dal pc operante presso il Laboratorio di Geomatica), associando ad ogni confronto la classe di appartenenza ed eventualmente producendo, visualizzando e segnalando il segnale di allarme.

In Fig. 5.39 è riportata una analisi e assegnazione delle classi di rischio singolarmente per ogni elemento misurato. Nel particolare il colore verde indica il livello di rischio molto basso poiché i dati trasmessi dal sensore non hanno mai superato la soglia prefissata

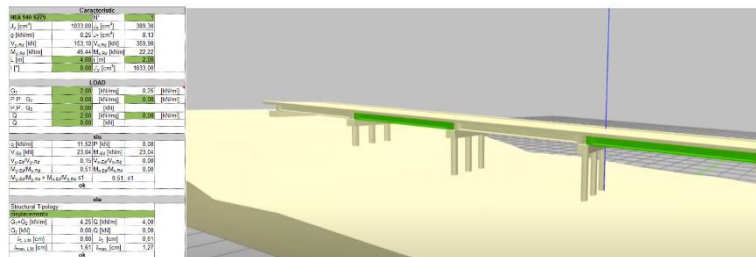


Figura 5.39 - Esempio di visualizzazione classe di rischio per elemento.

## 5.5 Soft computing analysis per la realizzazione di un modello previsionale del comportamento della infrastruttura nel tempo e sua visualizzazione su piattaforma

Una volta costruito il modello strutturale “finale” e avendo a disposizione sia i carichi agenti sulla infrastruttura che i dati di spostamento forniti dai sensori installati sulla stessa, si è proceduto all’implementazione di una rete neurale in modo da ottenere valori previsionali di comportamento dell’infrastruttura al variare degli spostamenti misurati.

I parametri precedentemente acquisiti dai sensori sono stati dunque utilizzati per ricreare le condizioni al contorno nei vari scenari ipotizzati per l’addestramento della rete neurale che è alla base del sistema predittivo.

Tutto il sistema, come detto, è stato realizzato ed implementato nel server centrale costituito ad oggi da un pc posizionato presso il Laboratorio di Geomatica del DICEAM dell’Univerita’ Mediterranea di Reggio Calabria.

Tutto il sistema è composto dalle seguenti componenti:

- RFEM (software di analisi strutturale) utile per produrre il modello “finale”
- SQLite3 ( C-language library)
- Google Colab ( Piattaforma per eseguire codice in linguaggio Python) utilizzata per implementare la rete neurale
- Pythontutor (piattaforma web per la visualizzazione del codice delle stringhe e delle librerie)
- Wordpad (software per la lettura dei file .csv)
- Email Attachment Downloader (software per il download automatico degli allegati alle mail)

Gli spostamenti e le rotazioni ottenuti dal modello “finale” sono resi disponibili in un file .csv .

Per memorizzare i dati dei sensori installati sul ponte e renderli disponibili in un server web viene generata una chiamata con Arduino (presente sulla centralina di acquisizione dati) attraverso l’inserimento

delle istruzioni all'interno del codice dello sketch come di seguito riportato:

```
http://[ip_server]:[porta]/?variabile1=valore1&variabile2=valore
2
```

Chiaramente i dati sono stati memorizzati attraverso la C-language library SQLite sul sistema Raspberry, che è un motore di DN (Versione estesa) leggero, veloce e compatibile con Python utilizzando la stringa di installazione sul Raspberry

```
sudo apt-get install sqlite3
```

Spostandosi sulla cartella di lavoro viene quindi creato il database

```
sqlite3 nome.db
```

Al fine di avere a disposizione le tabelle di dati provenienti dai sensori.

L'aggiornamento dei dati è stato pianificato attraverso un backup giornaliero del DB SQLite creato, nel crontab attraverso il comando :

```
echo '.dump' | sqlite3 /D:\User\Monitoraggio \ Annunziata
\sensori/[del]/[db]/[Sensori].db > exportdb
```

(nel file exportdb è presente lo script in SQL per la creazione del DB e il popolamento dello stesso).

Si è proceduto anche alla realizzazione di un server web usando la libreria Python web.py. Sever Web; lo stesso viene avviato al boot del sistema, sempre nel crontab attraverso il comando

```
# avvio il server web all'avvio del sistema@reboot python
/[cartella]/[server]/[web]/[web_applicazione].py [8000]
>>/[Monitoraggio
Annunziata]/[log]/[server]/[web]/[nome_file_log].log 2>&1
```

Così facendo il server resta in attesa sulla porta indicata (nell'esempio riportato è stata utilizzata la porta 8000) e a secondo delle chiamate GET ricevute, provvede a memorizzare i dati.

Per pianificare l'esportazione dei dati di misura su file creati all'interno della relativa cartella (nel nostro caso Monitoraggio Annunziata) è stato inserita la seguente riga di comando:

```
qlite3 -header -csv [Monitoraggio Annunziata Sensori].db "select
strftime('%d/%m %H:%M', Timestamp, 'localtime'), spostamenti" >
[annunziata sensore 1].csv
```

Viene così realizzato un file csv con i dati di misura ottenuti. La creazione del file avviene con cadenza giornaliera.

Per quanto riguarda i dati ricevuti via mail dal sistema con il firmware VADASE, si è proceduto automaticamente al salvataggio degli allegati ricevuti (all'interno della stessa cartella - Monitoraggio Annunziata-utilizzata per il salvataggio dei dati da sensore). Nel particolare attraverso l'uso dell'applicativo Email Attachment Downloader, inserendo la mail alla quale vengono inviati i dati monitorati e la password è stato possibile scaricare gli allegati selezionando il mittente (nel nostro caso il sistema VADASE) e la tipologia dell'allegato stesso (fig. 5.40)

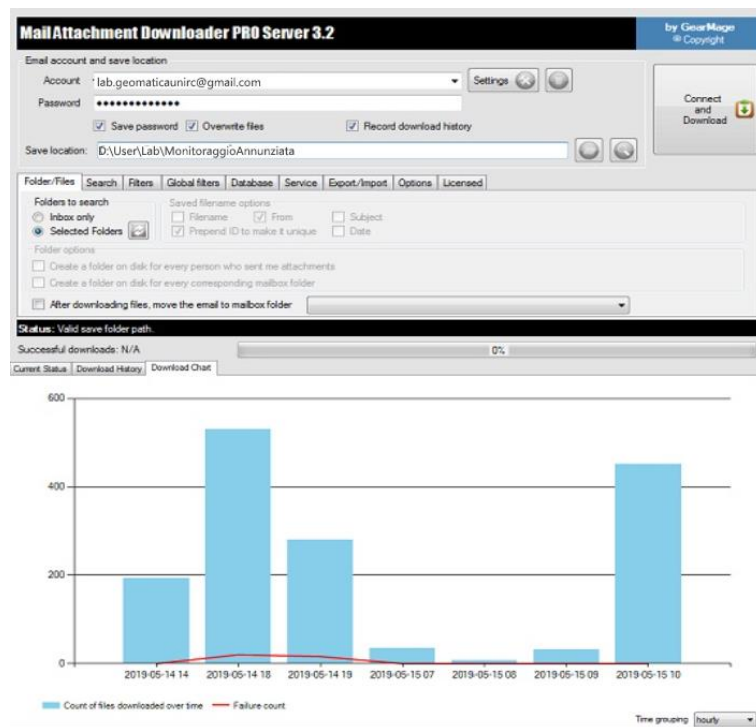


Figura 5.40 - interfaccia grafica Email Attachment Downloader

Il formato .csv viene utilizzato poiché è molto leggero e consente una lettura più veloce da parte del programma rispetto ad un file .xlsx (file in formato Excel).

Tra l'altro il richiamo del file csv all'intero dei sistemi che utilizzano il linguaggio python è oltremodo semplice utilizzando la stringa

```
data = pd.read_csv("sensori.csv", names=["Timestamp", "x", "y",
"z"], sep=";")
data.head()
```

Una volta avuti quindi a disposizione tutti i dati (sia modello che dati di spostamento) in formato csv, e' necessario utilizzare tecniche di

soft computing, in grado di fornire un valore previsionale in uscita al fine di conoscere in anticipo il comportamento dell'infrastruttura.

Atal proposito e' stat implementata una idonea rete neurale utilizzando la piattaforma Google colab per eseguire codici in linguaggio Python

Utilizzando tale piattaforma è stata dunque costruita una rete neurale a 3 strati con due livelli di input (spostamenti, carichi), due livelli nascosti e un livello di output. Il numero di nodi nel livello di input è determinato dalla dimensionalità dei dati (a discrezione del progettista) . Analogamente, il numero di nodi nel livello di output è determinato dal numero di classi di rischio definite precedentemente nel paragrafo “calcolo valori soglia” Chiaramente più nodi inseriamo nello strato nascosto, aumentando la dimensionalita’, più complesse possono essere le funzioni che saremo in grado di adattare, ma pagando conseguentemente sia il “costo computazionale” sia l’inclinazione a sovraperformare i nostri dati.

Per visualizzare il codice implementato e le librerie richiamate all’interno della rete neurale è stata utilizzata la piattaforma web python tutor, che è servita anche a stabilire il numero di nodi e neuroni sufficienti affinché la rete implementata potesse convergere ad un risultato corretto (fig. 5.41)

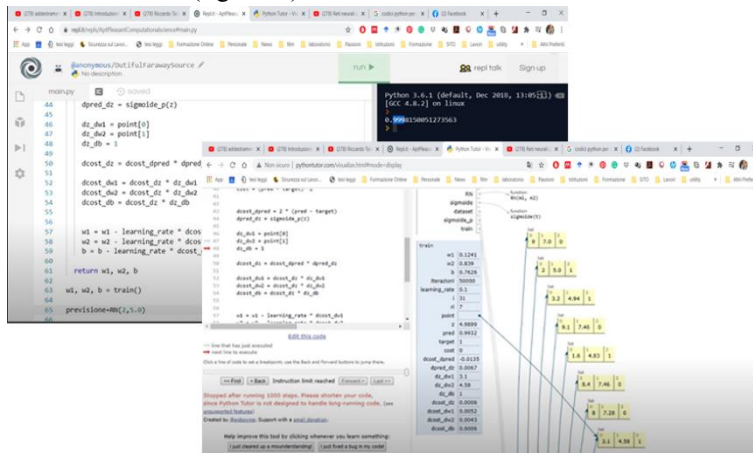


Figura 5.41 - Interfaccia grafica Pythontutor

La rete neurale scelta è basata sull’algoritmo della back-propagation.

L'algoritmo di back-propagation si sviluppa in due fasi: una fase iniziale e una fase di feedback. Nella prima fase di feed-forward, si ha un input  $x$  (Sorgenti di carico: vento, azione sismica, traffico - Risposte strutturali: spostamenti, deformazioni, accelerazioni e inclinazioni - Effetti ambientali: temperatura), e un valore di output  $y$  costituito da due valori (di cui uno per il livello di rischio e l’altro per gli spostamenti). Le variabili di input legate chiaramente agli effetti ambientali, sono variabili che possono essere acquisite da database esistenti, oltre che da previsioni meteorologiche giornaliere, o come nel caso in questione stabilite a priori. Le condizioni di carico da traffico

sono state calcolate, come detto, attraverso il calcolo del traffico giornaliero medio di progetto, ma si sta lavorando per stimare questa variabile utilizzando un contatore numerico basato su un sistema di riconoscimento automatico o veicolare basato sulla rete neurale Yolo. Come riportato nel paragrafo 4 “valori di soglia” i livelli di rischio sono stati stabiliti sperimentalmente dalla combinazione dei carichi dei diversi parametri di rischio implementati su software strutturale RFEM.

La seconda fase di back-propagation, invece, ha comportato un percorso a ritroso attraverso la rete neurale, calcolando il segnale di errore “e”, tra l'uscita desiderata “ya” e quella effettivamente ottenuta “y”; tale valore “e” è stato quindi propagato opportunamente dallo strato di uscita allo strato di ingresso, al fine di aggiornare i valori dei pesi e delle basi; infatti, questo segnale di errore è stato riportato attraverso tutti i layer della rete regolando o modificando contemporaneamente tutti i valori della connessione tra pesi e basi, portando così il valore in uscita calcolato “y” più vicino al valore in uscita desiderato “ya”. In particolare, l'apprendimento della rete utilizzando l'algoritmo di back-propagation avviene nelle seguenti fasi:

(1) inizializzazione di pesi e basi,

(2) presentazione delle coppie di ingresso / uscita desiderate. In questa fase, è stato scelto un vettore con 2 componenti di input ed è stato specificato il vettore di output desiderato.

La sintassi per la creazione della struttura della rete realizzata sulla piattaforma Colab in linguaggio Python è molto compatta. Il numero di nodi che compone gli strati nascosti della rete può essere agevolmente variato per testare varie configurazioni e trovare quella più performante in base alle caratteristiche dell'indagine effettuata, mentre il numero di neuroni dello strato di output deve necessariamente essere pari al numero di output che si vuole ottenere (9 valori nel nostro caso). Inoltre sono utilizzati due strati densi nascosti e uno di output, applicando alla fine di ogni ognuno di essi un layer con funzione dropout per prevenire fenomeni di overfitting. Gli strati nascosti utilizzano la funzione di attivazione relu.

Successivamente è stata definita la funzione per compilare la rete definendo i criteri di addestramento e valutazione. La funzione obiettivo utilizzata è stata “l'errore quadratico medio” (Mean Squared Error-MSE), poiché nelle previsioni regressive tale parametro è significativo ed è stato ottimizzato attraverso l'algoritmo AdamOptimizer (funzione per abbassare il valore di mse). La funzione metrica Metrics è stata scelta ed utilizzata per visualizzare la progressione del processo di apprendimento MAE (Mean Absolute Error-MAE) (fig. 5,42).

```

model = keras.Sequential([
    keras.layers.Dense(50, activation=tf.nn.relu,
                       input_shape=(train_x.shape[1],)),
    keras.layers.Dropout(0.2),
    keras.layers.Dense(30, activation=tf.nn.tanh),
    keras.layers.Dropout(0.2),
    keras.layers.Dense(9)
])

model.compile(loss='mse',
              optimizer='Adam',
              metrics=['mae'])

```

Figura 5.42 - stringa di codice per addestramento rete

Il modello previsionale utilizza un set di 24 valori (tutte le ore di una giornata) e prevede simultaneamente 24 valori, corrispondenti alle 24 ore della giornata successiva.

In relazione invece alle modalità di addestramento si osserva che nonostante sia stato impostato un valore limite di epoche molto alto, grazie all'implementazione di una funzione di Early Stopping il modello viene reso capace di fermare l'apprendimento nel momento in cui non risultino ottenuti ulteriori miglioramenti, evitando così di incorrere nei noti fenomeni di overfitting (fig. 5.43).

```

early_stop = keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=5)
EPOCHS=200
BATCH_SIZE=1
history = model.fit(train_x, train_y,
                    batch_size=BATCH_SIZE, epochs=EPOCHS, validation_split=0.1,
                    callbacks=[early_stop], verbose=1)

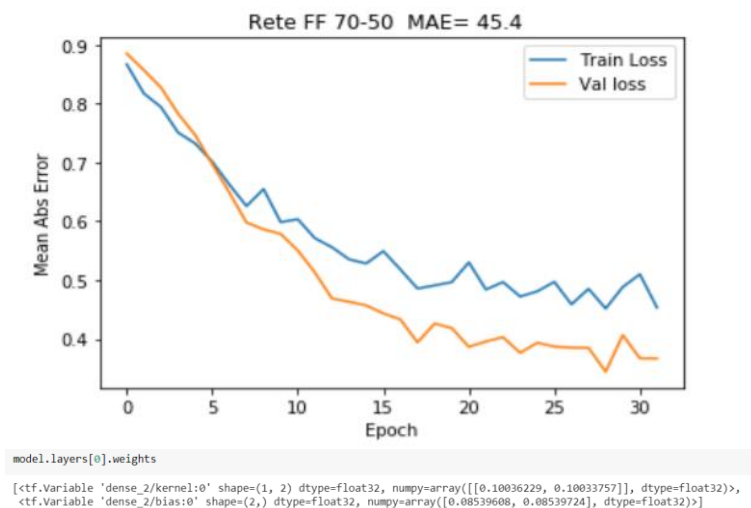
```

Figura 5.42 - stringa di codice per early stop

Da un punto di vista operativo, la rete neurale è stata così addestrata:

- Sul software strutturale sono state implementate diverse azioni di carico (vento, terremoto...) e diversi spostamenti (associati a cedimenti scelti per l'addestramento della rete) in diversi scenari al fine di evidenziare le diverse risposte della struttura.
- Su 1000 scenari implementati 200 sono stati utilizzati come test per verificare il corretto addestramento della rete neurale immettendo come input esclusivamente i dati di spostamento precedentemente scelti impostati e utilizzati, confrontando così la corrispondenza dei livelli di rischio ottenuti tra software e rete neurale nei vari scenari.

In figura 5.43 si riportano i grafici della variazione del Mean Abs Error (MAE) alle varie epoche del Train Loss (MSE in fase di training) e del Val Loss (MSE in fase di runtime)





**Figura 5.43** - a)variazione del Mean Abs Error aelle varie epoche del Train Loss e del Val Loss b) stringa di codice per la visualizzazione numerica

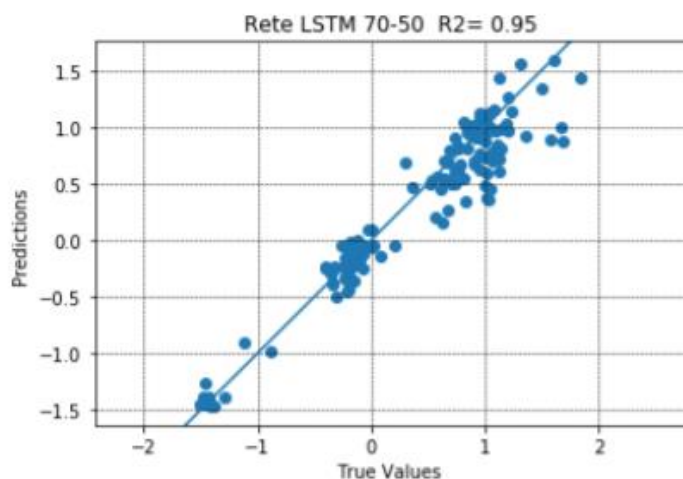
Sono state quindi testate varie configurazioni della rete variando il numero di nodi che compongono gli strati nascosti per valutare la configurazione più performante tenendo presente che lo script è stato impostato per fermare automaticamente l'apprendimento una volta che la funzione Loss selezionata non migliori dopo 5 epoche.

I risultati relativi alle reti sono illustrati nella Tabella 5.10 Data la natura stocastica del funzionamento delle reti neurali, per ogni configurazione è stato ripetuto il processo di training varie volte ottenendo risultati leggermente diversi ma con uno scostamento dal valore medio non significativo.

**Tabella 5.10** - prestazioni dell'addestramento rete settimanale

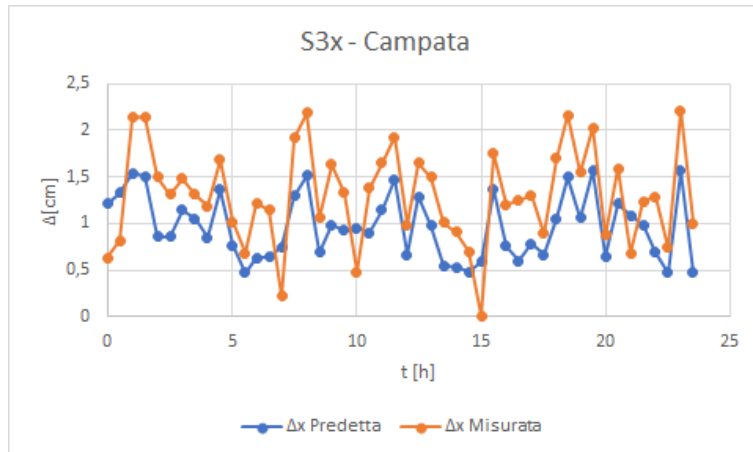
Struttura	Training		Validation		R <sup>2</sup>
	MSE	MAE	MSE	MAE	
1-2	0.808	0.795	0.757	0.715	0.894
2-3	0.815	0.802	0.748	0.712	0.912
3-4	0.822	0.815	0.752	0.718	0.948
4-5	0.856	0.848	0.753	0.718	0.953
5-6	0.812	0.797	0.758	0.721	0.951
6-7	0.879	0.871	0.753	0.718	0.955
7-8	0.809	0.796	0.755	0.719	0.953
Giorno precedente					0.938

I risultati ottenuti, come atteso, variano molto poco al variare della complessità della rete, tranne che per le epoche necessarie per addestrare il modello (vedi figura 5.44).

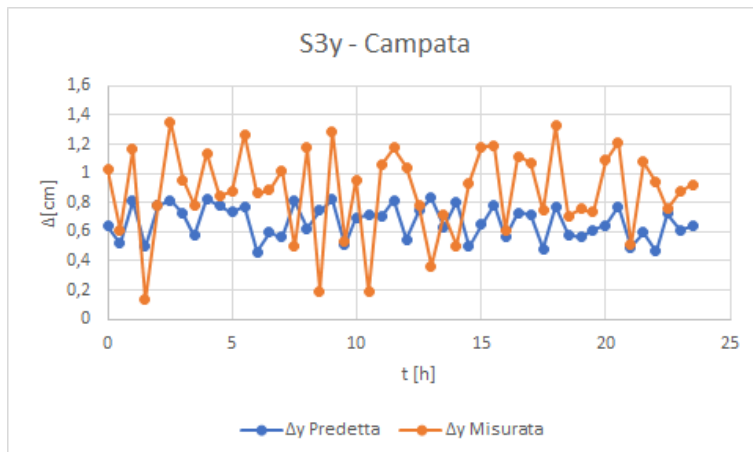


**Figura 5.44** - distribuzione R<sup>2</sup> valori Reali Valori Predetti

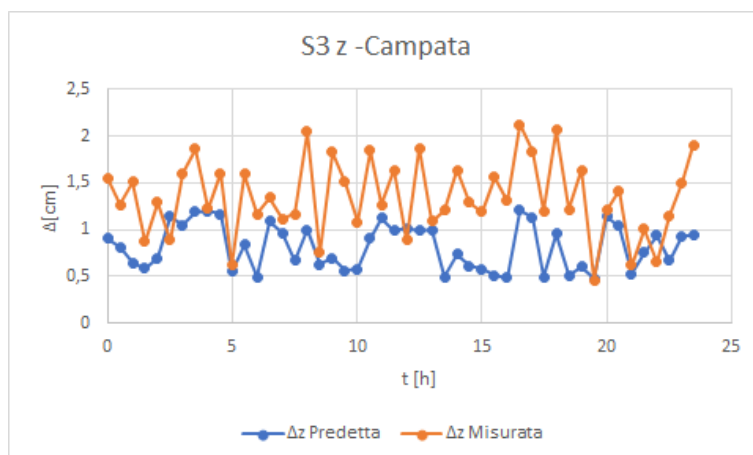
In relazione al parametri di output “spostamento” fornito dalla rete neurale, nelle figura 5.45, 5.46, 5.47 viene riportato il risultato del confronto tra i risultati attesi e quelli ottenuti.



**Figura 5.45** - Comparazione tra i risultati ottenuti e quelli attesi sulla campata lungo x



**Figura 5.46** - Comparazione tra i risultati ottenuti e quelli attesi sulla campata lungo y



**Figura 5.47** - Comparazione tra i risultati ottenuti e quelli attesi sulla campata lungo z

A questo punto una volta addestrata la rete si applicano come input della stessa direttamente i valori di spostamento ottenuti dai sensori (e non quelli da modello) attraverso il richiamo del file .csv

generato da sensori (tab.5.11), ottenendo in fase di output per ognuno degli elementi dell'infrastruttura, indipendentemente dal posizionamento dei sensori che hanno fornito i dati ingresso sensori, un valore di spostamento ed di rotazione atteso e una conseguente colorazione in funzione della classe di rischio attribuita.

**Tabella 5.11** - previsione comportamento strutturale dai valori misurati dai sensori lungo x

Profilo	s[cm]	r [°]	C
1-2	0,060	0,01	A
2-3	0,081	0,00	A
3-4	0,104	0,00	A
4-5	0,129	0,00	A
5-6	0,158	0,00	A
6-7	0,188	0,00	A
7-8	0,224	0,00	A
8-9	0,262	0,00	A
9-10	0,167	0,00	A
10-11	0,199	0,00	A
11-12	0,247	0,03	A
12-13	0,304	0,00	A
13-14	0,360	0,00	A
14-15	0,423	0,00	A
15-16	0,204	0,00	A
16-17	0,267	0,00	A
17-18	0,337	0,00	A
18-19	0,426	0,00	A
20-21	0,512	0,00	A
21-22	0,613	0,00	A
22-23	0,092	0,00	A
23-24	0,117	0,00	A
24-25	0,175	0,06	A
25-26	0,086	0,00	A
26-27	0,106	0,00	A
27-28	0,134	0,00	A
28-29	0,160	0,00	A
29-30	0,188	0,00	A
30-31	0,220	0,00	A

Come si può evincere dalla tabella 5.11, il valore della sperimentazione sta dunque nella possibilità di valutare, attraverso tecniche di soft computing utilizzate, la classe di rischio e quindi predire il comportamento della struttura utilizzando solo gli spostamenti e non tutti i parametri che nella determinazione del livello di rischio, parametri che invece sono stati utilizzati in una fase iniziale esclusivamente per addestrare la rete neurale.

Una volta ottenuti i risultati sia relativamente alla fase di Early Warning che a quella di previsione del comportamento dell'infrastruttura nel tempo si procede con la fase di visualizzazione dei risultati.

Nel particolare, per la fase di visualizzazione (sia per la fase di Early Warning che per quella di previsione del comportamento strutturale vale lo stesso principio di visualizzazione su piattaforma) è stata utilizzata una piattaforma di visualizzazione, così come dettagliatamente descritto nel capitolo 4, implementata in ambiente WordPress®, integrando protocolli di sicurezza SSL, che forniscono un

livello fondamentale di sicurezza online, essenziale quando si trasmettono informazioni sensibili.

Attraverso l'accesso all'area riservata del portale web è infatti possibile accedere direttamente alle centraline per modificarne la configurazione, settare le soglie per l'allarmistica, verificare i valori acquisiti in real time, usufruire dei dati rilevati ed archiviati per analisi e verifiche.

Dal punto di vista dell'early warning la piattaforma è dunque settata in modo tale da visualizzare, su idonea tabella, per ogni sensore, il valore misurato dallo stesso e una colorazione della casella relativa all'elemento strutturale ospitante il sensore rappresentativa dell'eventuale stato di allerta ottenuto dal confronto del valore misurato con i valori di soglia calcolati e definiti in fase di progettazione con l'ausilio del modello strutturale (fig.5.48).

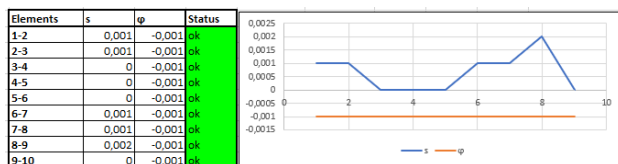


Figura 5.44 - Visualizzazione monitoraggio per sistema early warning.

Per quanto riguarda invece il sistema predittivo, la piattaforma di visualizzazione permette di visualizzare su schermo, oltre che i valori (numerici e grafici) di spostamento misurati dai sensori, anche le classi di rischio "predette" dalla rete neurale per ciascuna delle differenti componenti della infrastruttura (travi – pilastri-campate e basi) attraverso l'uso di colori corrispondenti ai differenti livelli di rischio (verde- molto basso, giallo- basso, arancione-alto o rosso-molto alto) precedentemente definiti;

A titolo esemplificativo, si riporta in figura 5.49 un esempio relativo al viadotto Annunziata. Dalla figura è possibile osservare sul lato sinistra il valore monitorato dal sensore nel tempo, mentre, nella tabella sul lato destro si evidenziano nell'ordine:

- Il nome degli elementi monitorati,
- il valore di spostamento misurato e utilizzato come input
- la classe di rischio predetta ("Status") e indicata attraverso il colore corrispondente



Figura 5.49 - Visualizzazione monitoraggio per sistema previsionale.

In figura 5.50 è infine riportata una visualizzazione d'insieme della piattaforma operante presso il server centrale posizionato presso il laboratorio Diceam dell'università Mediterranea

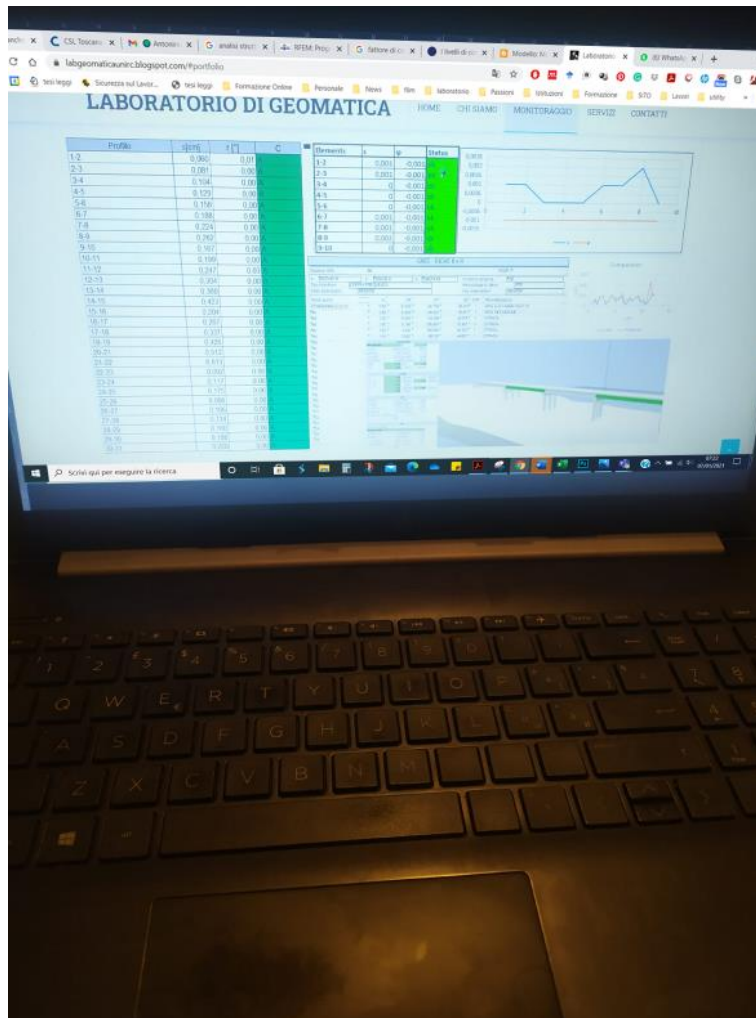


Figure 5.50 – Schermata a video del monitoraggio degli elementi orizzontali

**Bibliografia**

- Leonardi, G.; Palamara, R.; Cirianni, F. Landslide Susceptibility Mapping Using a Fuzzy Approach. *Procedia Eng.* 2016, 161, 380–387. [Google Scholar] [CrossRef]
- Barilla, D.; Leonardi, G.; Puglisi, A. Risk assessment for hazardous materials transportation. *Appl. Math. Sci.* 2019, 3, 2295–2309. [Google Scholar]
- Chen, S.-E.; Liu, W.; Dai, K.; Bian, H.; Hauser, E. Remote sensing for bridge monitoring. In *Condition, Reliability, and Resilience Assessment of Tunnels and Bridges*; Geotechnical Special Publication: Reston, VA, USA, 2011; Volume 214, pp. 118–125. [Google Scholar]
- Fukuda, Y.; Feng, M.Q.; Narita, Y.; Kaneko, S.; Tanaka, T. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm. *IEEE Sens. J.* 2013, 13, 4725–4732. [Google Scholar] [CrossRef]
- Gentile, C.; Cabboi, A. Vibration-based structural health monitoring of stay cables by microwave remote sensing. *Smart Struct. Syst.* 2015, 16, 263–280. [Google Scholar] [CrossRef]
- Harris, D.K.; Brooks, C.N.; Ahlborn, T.M. Synthesis of field performance of remote sensing strategies for condition assessment of in-service bridges in Michigan. *J. Perform. Constr. Facil.* 2016, 30, 04016027. [Google Scholar] [CrossRef]
- Vaghefi, K.; Oats, R.C.; Harris, D.K.; Ahlborn, T.M.; Brooks, C.N.; Endsley, K.A.; Roussi, C.; Shuchman, R.; Burns, J.W.; Dobson, R. Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment. *J. Bridge Eng.* 2012, 17, 886–895. [Google Scholar] [CrossRef]
- Nakamura, S.-I. GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. *J. Struct. Eng.* 2000, 126, 1413–1419. [Google Scholar] [CrossRef]
- Moschas, F.; Stiros, S. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Eng. Struct.* 2011, 33, 10–17. [Google Scholar] [CrossRef]
- Gikas, V. Ambient vibration monitoring of slender structures by microwave interferometer remote sensing. *J. Appl. Geod.* 2012, 6, 167–176. [Google Scholar] [CrossRef]
- Kalooop, M.R.; Li, H. Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement* 2014, 47, 531–539. [Google Scholar] [CrossRef]
- Elnabwy, M.T.; Kalooop, M.R.; Elbeltagi, E. Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique. *Measurement* 2013, 46, 4282–4292. [Google Scholar] [CrossRef]
- Voutetaki, M.E.; Papadopoulos, N.A.; Angeli, G.M.; Providakis, C.P. Investigation of a new experimental method for damage assessment of RC beams failing in shear using piezoelectric transducers. *Eng. Struct.* 2016, 114, 226–240. [Google Scholar] [CrossRef]
- Karayannis, C.G.; Voutetaki, M.E.; Chalioris, C.E.; Providakis, C.P.; Angeli, G.M. Detection of flexural damage stages for RC beams using Piezoelectric sensors (PZT). *Smart Struct. Syst.* 2015, 15, 997–1018. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chen, Y.; Xue, X. Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers. *Sensors* 2018, 18, 4312. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Liao, W.I.; Hsiao, F.P.; Chiu, C.K.; Ho, C.E. Structural health monitoring and interface damage detection for infill reinforced concrete walls in seismic retrofit of reinforced concrete frames using piezoceramic-based transducers under the cyclic loading. *Appl. Sci.* 2019, 9, 312. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chalioris, C.E.; Papadopoulos, N.A.; Angeli, G.M.; Karayannis, C.G.; Liolios, A.A.; Providakis, C.P. Damage evaluation in shear-critical reinforced concrete beam using piezoelectric transducers as smart aggregates. *Open Eng.* 2015, 5, 373–384. [Google Scholar] [CrossRef]
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A. Point cloud segmentation using image processing techniques for structural analysis. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019, 187–193. [Google Scholar] [CrossRef]
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A.; Bernardo, E. UAV Survey of Bridges and Viaduct: Workflow and Application. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in*

- Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 195–199. [Google Scholar]
- Pucinotti, R.; Fiordaliso, G. Multi-Span Steel–Concrete Bridges with Anti-Seismic Devices: A Case Study. *Front. Built Environ.* 2019, 72, 1–15. [Google Scholar] [CrossRef]
- Cristofaro, M.T.; Pucinotti, R.; Tanganelli, M.; De Stefano, M. The dispersion of concrete compressive strength of existing buildings. *Geotech. Geol. Earthq. Eng.* 2015, 33, 275–285. [Google Scholar]
- Pucinotti, R. Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 75, 331–341. [Google Scholar] [CrossRef]
- Pucinotti, R. Assessment of in situ characteristic concrete strength. *Constr. Build. Mater.* 2013, 44, 63–73. [Google Scholar] [CrossRef]
- Bursi, O.S.; Bonelli, A.; Mammino, A.; Pucinotti, R.; Tondini, N. External post-tensioning retrofitting and modelling of steel–concrete boxgirder bridges. In *Proceedings of the 7th International Conference on Steel Bridges*, Guimaraes, Portugal, 4–6 June 2008; pp. 425–434. [Google Scholar]
- Moschasa, F.; Stiros, S. Noise characteristics of short-duration, high frequency GPS-records Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing. *Ser. Adv. Math. Appl. Sci.* 2012, 84, 284–291. [Google Scholar]
- Psimoulis, P.A.; Stiros, S.C. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and robotic theodolites (RTS) records. *Comput. Struct.* 2012, 92–93, 337–348. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chen, S.-E.; Liu, W.; Dai, K.; Bian, H.; Hauser, E. Remote sensing for bridge monitoring. In *Condition, Reliability, and Resilience Assessment of Tunnels and Bridges*; Geotechnical Special Publication: Reston, VA, USA; Volume 214, pp. 118–125 (2011).
- Fukuda, Y.; Feng, M.Q.; Narita, Y.; Kaneko, S.; Tanaka, T. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm. *IEEE Sens. J.*, 13, 4725–4732 (2013).
- Gentile, C.; Cabboi, A. Vibration-based structural health monitoring of stay cables by microwave remote sensing. *Smart Struct. Syst.*, 16, 263–280 (2015).
- Harris, D.K.; Brooks, C.N.; Ahlborn, T.M. Synthesis of field performance of remote sensing strategies for condition assessment of inservice bridges in Michigan. *J. Perform. Constr. Facil.*, 30, 04016027, (2016).
- Vaghefi, K.; Oats, R.C.; Harris, D.K.; Ahlborn, T.M.; Brooks, C.N.; Endsley, K.A.; Roussi, C.; Shuchman, R.; Burns, J.W.; Dobson, R. Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment. *J. Bridge Eng.*, 17, 886–895 (2012).
- Moschas, F.; Stiros, S. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Eng. Struct.*, 33, 10–17 (2011).
- Kalooop, M.R.; Li, H. Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement*, 47, 531–539 (2014).
- Elnabwy, M.T.; Kalooop, M.R.; Elbeltagi, E. Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique. *Measurement*, 46, 4282–4292, (2013).
- Voutetaki, M.E.; Papadopoulos, N.A.; Angeli, G.M.; Providakis, C.P. Investigation of a new experimental method for damage assessment of RC beams failing in shear using piezoelectric transducers. *Eng. Struct.*, 114, 226–240 (2016).
- Karayannis, C.G.; Voutetaki, M.E.; Chalioris, C.E.; Providakis, C.P.; Angeli, G.M. Detection of flexural damage stages for RC beams using Piezoelectric sensors (PZT). *Smart Struct. Syst.*, 15, 997–1018 (2015).
- Chen, Y.; Xue, X. Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers. *Sensors*, 18, 4312. (2018)
- Liao, W.I.; Hsiao, F.P.; Chiu, C.K.; Ho, C.E. Structural health monitoring and interface damage detection for infill reinforced concrete walls in seismic retrofit of reinforced concrete frames using piezoceramic-based transducers under the cyclic loading. *Appl. Sci.*, 9, 312 (2019).
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A. Point cloud segmentation using image processing techniques for

- structural analysis. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 187–193 (2019).
- Barrile, V.; Candela, G.; Fotia, A.; Bernardo, E. UAV Survey of Bridges and Viaduct: Workflow and Application. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 195–199 (2019).
- Pucinotti, R.; Fiordaliso, G. Multi-Span Steel–Concrete Bridges with Anti-Seismic Devices: A Case Study. *Front. Built Environ.*, 72, 1–15 (2019).
- Moschasa, F.; Stiros, S. Noise characteristics of short-duration, high frequency GPS-records *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing. Ser. Adv. Math. Appl. Sci.*, 84, 284–291 (2012).
- Psimoulis, P.A.; Stiros, S.C. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and robotic theodolites (RTS) records. *Comput. Struct.*, 92–93, 337–348 (2012).



## Conclusioni

Gli argomenti presenti nella presente tesi di dottorato sono molteplici ed hanno osservato diversi aspetti della problematica del monitoraggio delle infrastrutture presenti.

La ricerca ha visto protagonista il processo di monitoraggio infrastrutturale affrontando tutte le sue fasi. Si è partiti dal rilievo e modellizzazione dell'infrastruttura attraverso tecniche fotogrammetriche da UaV, per poi mettere a punto un sistema per l'estrazione automatica della geometria degli elementi che la compongono. Il sistema utilizzato chiaramente anche come strumento per l'analisi visuale, ha permesso così di ottenere i dati necessari all'a creazione di un modello strutturale finale, necessario per esaminare oltre un migliaio di possibili scenari provenienti dalle diverse combinazioni di carico e cedimenti; il tutto finalizzato come ampiamente descritto all'addestramento di una rete neurale indirizzata a predire il comportamento futuro dell'infrastruttura.

Chiaramente il modello strutturale utilizzato nella presente sperimentazione, anche se performante in relazione alle sperimentazioni effettuate, è un modello semplificato. Sarebbe pertanto auspicabile poter ripetere la sperimentazione utilizzando da un lato un modello strutturale più complesso (carichi variabili) e dall'altro verificarlo su una infrastruttura test sulla quale poter monitorare spostamenti più importanti.

La rete neurale addestrata è stata "tarata" in modo da poter predire gli spostamenti (scenario  $n+1$ ) che si verificheranno sull'infrastruttura nelle 24 ore successive, in un ciclo di quattro settimane.

Tuttavia si rimanda ad ulteriori verifiche della bontà dei risultati (conseguenti a tutte le semplificazioni apportate), poiché sia l'addestramento che la fase di test sono avvenute sul modello virtuale e non è stato possibile effettuare un confronto con il reale comportamento della infrastruttura. Infatti purtroppo (per le nostre attività di ricerca) e per fortuna (per la stabilità del viadotto) non sono stati misurati spostamenti "reali" che potessero in qualche modo testare la bontà del sistema predittivo (il test è stato condotto sui parametri ottenuti dal modello strutturale").

Da un punto prettamente Geomatico, le attività che si sono portate avanti hanno visto anche testare i risultati di un sistema di sensori GPS low cost. I risultati ottenuti hanno mostrato come per le applicazioni proposte il sistema può tranquillamente sostituire i sistemi tradizionali. Chiaramente qualora il sistema verrà strutturato in modo da poter avere un modello più dettagliato è preferibile utilizzare un sistema di monitoraggio più performante, come quello utilizzato inizialmente in fase di monitoraggio (VADASE).

Il lavoro di ricerca ha cercato dunque di fornire un contributo propositivo per la risoluzione di problematiche inerenti il monitoraggio e la gestione delle infrastrutture il tutto finalizzato a proporre una soluzione alternativa ai sistemi fino ad oggi utilizzati.

Si ritiene infatti che avere la possibilità di monitorare solo alcuni parametri (e nello specifico quelli di spostamento) per conoscere il comportamento dell'intera infrastruttura, possa essere un ottimo strumento a servizio degli enti gestori per la gestione delle contingentate risorse da dedicare alla manutenzione oltre che un'ottima soluzione per individuare la sicurezza degli utilizzatori finali.