Politecnico di Torino

Corso Di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Indirizzo Strutture

Monitoraggio di ponti esistenti: analisi della risposta strutturale con Processi Gaussiani



Relatore

Prof. Ing. Giuseppe Carlo Marano

Correlatore

Dott. Ing. Davide Masera

Ing. Rebecca Asso

Candidato

Davide Perino

A.A. 2021/2022

Abstract

La rete infrastrutturale italiana ed europea è giunta oramai quasi al termine della vita di progetto, e di conseguenza la priorità delle operazioni di ripristino e di ricostruzione delle strutture principali della rete deve essere regimata. Il degrado crescente dovuto alle azioni ambientali e ai carichi estremamente maggiori rispetto al periodo di costruzione ha portato ad un indebolimento della rete, che purtroppo non è stato supportato da un'adeguata conoscenza. Questi problemi fanno del monitoraggio strutturale una risorsa fondamentale da sviluppare al più presto. Lo scopo di questa tesi è lo sviluppo di una delle innumerevoli possibilità che offre il monitoraggio, e cioè l'utilizzo di sensori di vario tipo, quali estensimetri e sonde termiche per valutare e stimare l'impatto del traffico giornaliero odierno sulle deformazioni di cui un ponte è soggetto. Tramite la catalogazione degli spostamenti giornalieri dei dispositivi di appoggio di un ponte mediante i sensori collocati sulla struttura si è mirato alla definizione dell'influenza che hanno il traffico leggero e pesante su tali spostamenti. Per quanto riguarda la fase di analisi dati, dopo una prima fase di filtro per depurare i dati da eventuali errori, sono stati utilizzati degli algoritmi di origine Gaussiana per l'identificazione di un modello generico di risposta della struttura ai carichi causati dalla variazione termica e dal traffico pesante e leggero. Tramite una calibrazione delle funzioni di covarianza e dei parametri dei processi gaussiani è stato possibile ottenere la funzione che identificasse al meglio il modello di analisi. Infine i dati relativi al passaggio delle vetture leggere e pesanti sono stati direttamente correlati al rumore del Processo Gaussiano identificato, permettendo la riduzione dell'incertezza del modello matematico della struttura. I risultati ottenuti sono un grande esempio del potenziale che il monitoraggio offre, e i futuri sviluppi potrebbero portare all'analisi della risposta della struttura generica soggetta a svariati tipi di carichi.

1 SOMMARIO

1	Son	mmario	5		
2		roduzione			
	2.1	Organizzazione della tesi	8		
3	Stato dell'arte del monitoraggio e gestione di infrastrutture esistenti				
	3.1 Quadro normativo italiano				
	3.2	Il degrado strutturale e l'influenza dei carichi variabili da traffico	13		
	3.2.	.1 Degrado strutturale della fatica	17		
	3.3	Il monitoraggio strutturale (SHM)	20		
	3.3.	.1 Supervised learning e unsupervised learning	21		
	3.3.	.2 Monitoraggio statico e dinamico	23		
4	II ca	aso di studio	25		
	4.1	Sezione trasversale impalcato	26		
	4.2	Sistemi di vincolo	29		
	4.2.	.1 Ritegni sismici elastoplastici-multidirezionali	29		
5					
	5.1	Obbiettivo del monitoraggio	31		
	5.2	Schema di posizionamento del sistema di monitoraggio	31		
	5.2.	.1 Convenzione dei segni degli spostamenti	31		
	5.3 Elementi costituenti il sistema di monitoraggio				
	5.3.	.1 Estensimetri elettrici	37		
	5.3.	.2 Sonda termica NTC	38		
	5.3.	.3 Pannelli fotovoltaici e box centralina	38		
	5.4	Campionamento ed elaborazione dati	39		
6	Metodologia				
	6.1	Regressione Gaussiana	40		
	6.2	Regressione lineare con rumore Gaussiano	41		
	6.2	.1 Predizioni con rumore	44		
	6.3	Iperparametri	44		
	6.4	Selezione del modello secondo il criterio Bayesiano	45		
	6.5 Cross-validation				
	6.6	Analisi struttura kernel	47		
	6.7	Caso studio Z-24 Bridge di E. Figueiredo e A. Santos ⁶	48		
7	Analisi dati e discussione risultati				
	7.1 Preprocessing				
	7.2	Postprocessing	56		
	7.3	Analisi temperatura - spostamenti	56		
	7.3.	.1 Regressione temperatura - tempo	59		

7	7.3.1	Regressione spostamenti - tempo e analisi dispersione degli spostamenti	60	
7	7.3.2	Regressione temperatura - spostamenti	64	
7.4	An	alisi traffico leggero e pesante	65	
7.5	Ca	lcolo grado di correlazione con coefficiente di Pearson	68	
7.6	An	damento traffico leggero e dispersione degli spostamenti	70	
7.7	Sv	luppi futuri	72	
8 (Conclusioni		74	
9 E	Bibliografia			
10	Ringr	aziamenti	79	

2 Introduzione

Si sente sempre più parlare del problema dei ponti e più in generale delle infrastrutture in Italia. La rete autostradale italiana conta un'estensione di 6965,4 km¹, suddivisa tra trafori, autostrade in concessione ed autostrade direttamente gestite da ANAS². Lungo questa estensione si trovano innumerevoli ponti e viadotti, per la precisione le autostrade italiane contano 1943 ponti³. Alcune di queste strutture risalgono agli anni 50 e 60 se non prima. Uno dei maggiori problemi, infatti è proprio l'età estremamente avanzata di tali opere d'arte. In aggiunta a questo, ponti e viadotti sono soggetti a carichi sempre più crescenti dovuti ai volumi di traffico in continuo aumento lungo tutta la rete stradale italiana.

Come stabilito dalla normativa italiana⁴ i ponti e le opere con funzioni pubbliche o strategiche importanti a livello nazionale, sono progettate con una vita nominale di progetto di 100 anni, questo non significa però che progettata e costruita l'opera non ci debba essere un controllo e nel caso un rinforzo o anche una ricostruzione di alcune parti di essa. Se in più si considera che i carichi con cui sono state progettate tali opere non corrispondono più alle sollecitazioni agenti ogni giorno. È lampante il fatto che ci debba essere un controllo costante ed un ammodernamento del monitoraggio di tali strutture per arrivare a prioritizzare i lavori di ripristino, rinforzo e ricostruzione.

La seguente tesi tratta e studia queste problematiche, prendendo come esempio di studio un ponte della rete stradale italiana. Partendo dal quadro normativo del monitoraggio dell'opere d'arte, passando dai principi teorici e utilizzando il monitoraggio per studiare la correlazione tra le deformazioni di un ponte ed il passaggio veicolare che avviene su di esso. Un grosso problema dei ponti è il degrado dato del passaggio continuo dei mezzi, che si può tradurre in fatica. Queste strutture sono soggette a carichi ciclici continui che col passare del tempo possono portare al deterioramento dei materiali con conseguente crollo dell'intera opera.

La conoscenza dello stato di conservazione delle infrastrutture italiane è estremamente bassa. C'è una mappatura e programmazione dei controlli ad opera di autostrade ed ANAS⁵ mediante società di ingegneria esterne, con ispezioni periodiche ma non è sufficiente e non fornisce una conoscenza attendibile delle strutture. Il monitoraggio non è da intendersi in sostituzione ad ispezioni ed i controlli in laboratorio, anzi è una applicazione in più da affiancare a queste azioni per il controllo delle infrastrutture. Non solo delle infrastrutture vecchie ma anche di quelle più recenti e di quelle di nuova costruzione. Un passo fondamentale del monitoraggio è proprio il controllo dei nuovi viadotti così da avere dei dati riconducibili a strutture in salute per poter allenare dei modelli e studiare al meglio il comportamento generale di questo tipo di opere. Il monitoraggio permette un controllo quotidiano delle opere così da avere sempre un feedback per la eventuale programmazione di interventi e non arrivare troppo tardi per la salvaguardia delle opere e della vita umana.

Il monitoraggio strutturale non consente soltanto l'identificazione di danni progressivi nel tempo, ma permette di monitorare le prestazioni durante le fasi di esercizio o durante eventi eccezionali, il tutto per creare una base di dati per lo studio così da avere la possibilità di creare dei modelli il più generici possibili per poi essere applicati alle più svariate strutture. Dal punto di vista hardware ci sono tante possibilità, ma l'analisi dati è ancora un mistero.

In letteratura sono presenti svariate famiglie di algoritmi di analisi:

- Mahalanobis squared distance MSD⁶
- ➢ Gaussian mixture model GMM⁶
- Principal component analysis o Kernel principal component analysis^{6,7}
- Reti neurali artificiali ANN^{8,9} (Figura 2.1).

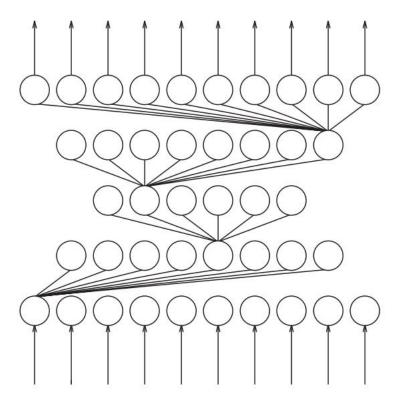


Figura 2.1 - Rete neurale auto-associative9

La ricerca è ancora molto indietro riguardo ai metodi di analisi, anche perché ogni opera è unica, soprattutto se si parla di infrastrutture stradali, quindi ogni monitoraggio si deve specificare sul caso studio, visto che le strutture sono affette da tanti fattori che ne caratterizzano il degrado e la risposta.

Il monitoraggio coinvolge un numero elevato di applicazioni nel campo dell'ingegneria civile, non solo la valutazione del danno, ma anche il progetto ed il rinforzo di strutture esistenti o nuove, il controllo in esercizio e in eventi eccezionali come il sisma e la manutenzione ordinaria.

2.1 Organizzazione della tesi

➤ Nel primo capitolo della presente tesi si trova un'analisi riguardo a tutto lo stato dell'arte comprendente il monitoraggio, a partire dall'evoluzione della normativa italiana dagli anni 1950/1960 fino alle ultime linee guida emanate. Successivamente, viene presentato un

- approfondimento riguardante il degrado delle infrastrutture e il legame che c'è con i carichi da traffico e la fatica. Per finire con le diverse tipologie di monitoraggio presenti.
- A seguire il capitolo 3 presenta il caso studio in esame. Sono quindi introdotte la geometria e le caratteristiche del viadotto, le tipologie di appoggio ed i materiali.
- Nel capitolo 4 si illustra lo schema comprendente la parte software del monitoraggio, dai sensori fisici installati in sito con le schede tecniche fino alla centralina. È inoltre descritta la metodologia di campionamento e la raccolta dei dati con annessa trasmissione.
- Nel capitolo 5 viene presentata la metodologia e lo studio dei vari algoritmi per l'analisi dei dati raccolti. Dai processi gaussiani, alle regressioni lineari, passando per i concetti di rumore e di iperparametri, arrivando all'analisi con kernel e concludendo con uno sguardo a degli studi con l'applicazione delle regressioni lineari.
- Nel capitolo 6 è presente la parte di analisi vera e propria. Sono presentati il pre- e post-processing e successivamente lo studio delle varie grandezze in gioco, a partire dallo studio della temperatura e degli spostamenti in funzione del tempo e ad una prima correlazione tra temperatura e spostamenti correlati assieme, proseguendo con l'analisi del traffico, suddiviso in leggero, pesante e totale. Il capitolo si conclude con le correlazioni tra i dati relativi ai dati di input (traffico e temperatura) e dati di output, scorporando effetti primari e secondari.
- Nel capitolo 7 sono riassunte le conclusioni dello studio presentato, con una riflessione finale su possibili altre applicazioni della procedura descritta e altri futuri sviluppi.

3 STATO DELL'ARTE DEL MONITORAGGIO E GESTIONE DI INFRASTRUTTURE ESISTENTI

3.1 Quadro normativo italiano

La rete di infrastrutture italiana è formata da un esteso patrimonio, nella maggior parte costruito a partire dalla metà del '900 (dopo il secondo dopoguerra) e che ha poi ha avuto ulteriori ampliamenti. La normativa italiana, tuttavia, non ha considerato lo sviluppo parallelo delle parti inerenti al monitoraggio strutturale. La prima documentazione a riguardo è stata infatti introdotta a seguito del crollo del ponte Ariccia¹⁰, il tragico evento che costituì una dimostrazione lampante del fatto che in Italia non esistesse alcun tipo di supervisione dei ponti. Famoso fu l'editoriale a riguardo pubblicato da La stampa nel 1967 con il titolo di "Nessuno in Italia controlla i ponti" (Figura 3.1).



Figura 3.1 – La Stampa, crollo ponte di Ariccia¹¹

Successivamente venne diramata la Circolare Ministeriale LL PP 6736/61A1¹², la quale stabiliva che i ponti e, più in generale, le strutture civili, necessitavano di un controllo periodico per la sicurezza. Introduceva inoltre l'obbligo di ispezioni trimestrali ed indagini approfondite, con specifica per ponti e viadotti di grande luce e controllo speciale da parte del Ministero.

Successivamente, fu emanata nel 1980 la Circolare Ministeriale LL PP 220977¹³ 02/08/1980 che dava i criteri generali e prescrizioni tecniche per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di ponti stradali. In tale documento non si parla chiaramente di monitoraggio ma si fa cenno al fatto che durante le fasi di costruzione ed esercizio ci fosse la necessità di ispezioni atte alla salvaguardia dell'opera e il suo funzionamento. Ci fu un seguente aggiornamento con la Circolare Ministeriale LL PP 34233 25/02/1991¹⁴ sempre con istruzioni tecniche per i ponti stradali. In esso è presente un capitolo che riguardava gli enti gestori dei viadotti sul fatto di effettuare una vigilanza sulle opere tramite ispezioni in sito e manutenzione ordinaria ed in caso di eventi eccezionali, come sisma o alluvioni, manutenzione straordinaria.

Un importante documento è la Norma UNI 10985 "Vibrazioni su ponti e viadotti" 2002 che descrive i criteri generali per esecuzione di prove e rilievi dinamici su ponti e viadotti, descrivendone la strumentazione e le possibili metodologie. In questa norma sono prese in considerazione le vibrazioni e quindi rilievi e prove dinamiche dando tutta una serie di indicazioni su come muoversi in funzione dei diversi materiali di cui è fatta l'opera.

La norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" del 2016 stabilisce le linee guida di un monitoraggio durante l'esercizio andando a valutare gli specifici parametri che caratterizzano una struttura. Come già detto nelle normative precedenti si ricorda che comunque affinché si abbia un controllo completo è necessario che al monitoraggio si affianchino sempre delle indagini in sito. I parametri interessati dal monitoraggio, non sono tutti misurabili direttamente ma alcuni devono essere ricavati dall'elaborazione dei dati delle altre grandezze:

- L'indice di danno
- L'indice della vita residua
- Il livello di prestazione

La normativa fornisce anche indicazioni operative molto utili come la collocazione dei sensori in funzione delle varie opere e la modalità e la quantità di dati in termini di frequenza e periodicità da acquisire in funzione della grandezza da misurare.

Dopo la tragedia del crollo del ponte Morandi del 14 agosto 2018 è stato emanato il Decreto Genova¹⁷ 19/11/2018 che contiene, per quanto riguarda il monitoraggio delle strutture, la possibilità di utilizzare delle tecnologie sperimentali e strumentazioni 5G come del resto si stava sviluppando in tutta europa¹⁸. Il decreto ha previsto anche l'istituzione dell'ANFISA, Azienda Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali, la quale ha lo scopo di redigere un documento per l'adeguamento delle infrastrutture stradali con l'obbiettivo di garantire la sicurezza.

Le "linea Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti" per le attività di verifica della sicurezza tramite un metodo multilivello che via via aumenta l'accuratezza e il grado di approfondimento. Questo metodo suddiviso su più livelli si è reso necessario vista la grande varietà di opere esistenti sul territorio italiano che fino a quel momento erano state gestite con strategie meno riconosciute a livello nazionale. Inoltre detto metodo consente di valutare inizialmente lo stato dell'opera ed il suo livello di degrado. Successivamente in funzione delle informazioni ottenute è possibile programmare le ispezioni e le indagini per una valutazione più accurata della sicurezza, così da avere una programmazione dettagliata delle attività di monitoraggio. Come riassunto in Figura 3.2 i sei livelli sono:

- Livello 0: censimento e caratteristiche delle opere.
- Livello 1: esecuzione di ispezioni visive al fine di individuare lo stato di degrado e le caratteristiche geo-morfologiche e idrauliche.

- ➤ Livello 2: determinazione classe di attenzione attraverso i parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.
- > Livello 3: valutazioni preliminari per eventuali verifiche accurate di livello 4.
- Livello 4: valutazioni accurate secondo le NTC.
- Livello 5: valutazione resilienza applicata ai punti considerati di significativa importanza all'interno della rete

Si possono notare i tre macro-temi trattati dalle linee guida poi sviluppati con più precisione dei vari livelli. La classificazione della struttura (livelli 0,1 e 2), valutazione della sicurezza (livelli 3 e 4) e il monitoraggio dell'intera rete (livello 5). In dettaglio, possiamo riassumere che:

- Livello 0: prevede il censimento tramite un lo studio di tutta la documentazione presente sull'opera in esame e l'archiviazione a livello nazionale. Per fare questo viene in aiuto l'ANFISA che si occupa proprio di questa catalogazione.
- Livello 1: integrazione delle informazioni ottenute nel primo livello tramite indagini visive e rilievi geometrici con la compilazione di schede create appositamente per il rilevamento di danni.
- Livello 2: passaggio fondamentale dello studio dell'opera perché stabilisce la classe di attenzione che poi determinerà gli interventi da realizzare successivamente. Si hanno 5 classi di attenzione decrescenti dalla più alta alla più bassa, e la determinazione di esse passa per la combinazione di fattori di pericolosità, vulnerabilità e esposizione. La classe di attenzione complessiva altro non è che una stima approssimata dei fattori di rischio.
- Livello 3: ottenuti i risultati dalle valutazioni dei primi livelli in questa fase si fa una prima valutazione della sicurezza. Si effettua un confronto tra le norme utilizzate per la progettazione all'epoca e le norme vigenti attualmente.
- ➤ **Livello 4**: in questa fase si fa un'accurata valutazione della sicurezza stabilendo se l'esercizio del ponte possa proseguire senza interventi. Tutto ciò è fatto con un'attenta analisi delle norme NTC per stabilire se le verifiche sono soddisfatte o meno.
- ➤ Livello 5: da delle indicazioni approssimative sui possibili metodi di monitoraggio. Sono solo delle informazioni generali per l'individuazione della procedura di valutazione più appropriata per le diverse opere in esame.

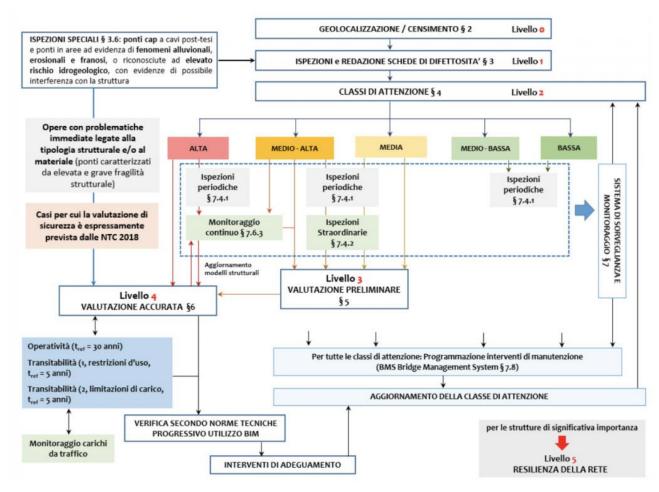


Figura 3.2 – Schema multilivello e relazione tra livelli di analisi¹⁹

3.2 Il degrado strutturale e l'influenza dei carichi variabili da traffico

Le strutture quali ponti e viadotti sono progettati considerando l'azione di carichi esterni che possono essere riassunti come appartenenti ad alcune categorie:

- Peso Proprio
- > Carichi Permanenti
- Carichi Variabili da Traffico (Figura 3.3)
- Vento
- > Temperatura

I carichi variabili da traffico sono la principale fonte di carico e si dividono in:

- > carichi verticali
- > carichi longitudinali dati da frenate o accelerazioni
- azioni centrifughe

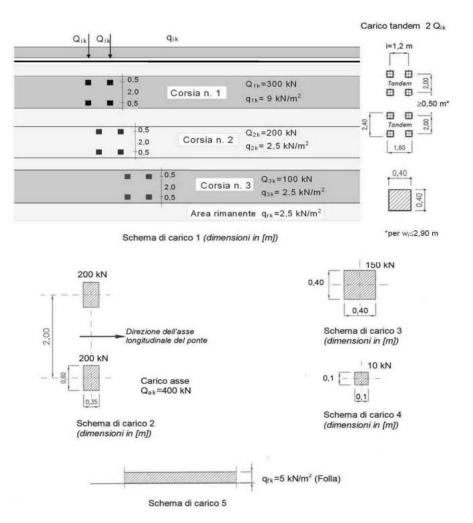


Figura 3.3 - Schemi di carico 1 - 5 (dimensioni in m)⁴

La risposta indotta da questo tipo di sollecitazione era studiata in fase di progetto, schematizzando il traffico come un carico puntuale in movimento ed il ponte come una semplice trave ²⁰. Il carico gravante sui viadotti e ponti dipende da numerosi fattori come il peso dei veicoli, la configurazione degli assi, la collocazione del veicolo sull'impalcato, il numero di veicoli presenti e la velocità di ogni mezzo. La stima dei carichi di traffico sui ponti è generalmente fittizia e quindi può essere eccessivamente cautelativa. In questo ambito, un calcolo puntuale del carico da traffico effettivamente agente sulla struttura può portare a dei grandi risparmi e vantaggi²¹. Per quanto riguarda il carico dei veicoli in movimento non è solo un problema per la sicurezza della viabilità, ma questo tipo di sollecitazione porta ad un degrado strutturale ulteriore delle infrastrutture. Infatti si possono avere degli effetti di degrado combinati, che portano ad un deterioramento con una crescita esponenziale, come per esempio delle forti temperature ambientale unite a dei livelli di traffico elevati che portano a considerevoli riduzioni della resistenza alla fatica delle strutture. Inoltre nel tempo il carico del traffico è aumentato notevolmente; quindi, ponti come quelli costruiti negli anni '60, sono soggetti a carichi ben maggiori e più frequenti rispetto a quelli con cui erano stati progettati. I dati AISCAT²², confermano che solamente nell'ultimo periodo dal 2001 al 2018, il traffico complessivo in milioni di veicoli al km sulle reti autostradali è cresciuto del 18,92%, da 73.143,4 milioni a 86.979,5. Nello specifico la classe dei veicoli leggeri

ha avuto un incremento del 19,65% da 55.886,8 milioni a 66.867 mentre quella dei veicoli pesanti ha avuto una crescita del 16,55% da 17.256,6 a 20.112,5. Se si va più a ritroso e si analizza l'aumento del traffico dagli anni 90 ad oggi si può notare un aumento del traffico del 69%²³.

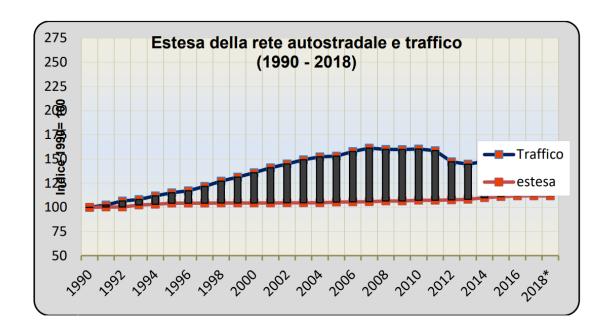


Figura 3.4 - Aumento rete autostradale e traffico²³

Dai dati delle serie storiche dell'ACI²⁴ si può vedere l'aumento del parco autovetture (Figura 3.5) degli ultimi 90 anni. Si nota che il numero di autovetture dagli anni 60 al 2011 è praticamente raddoppiato.

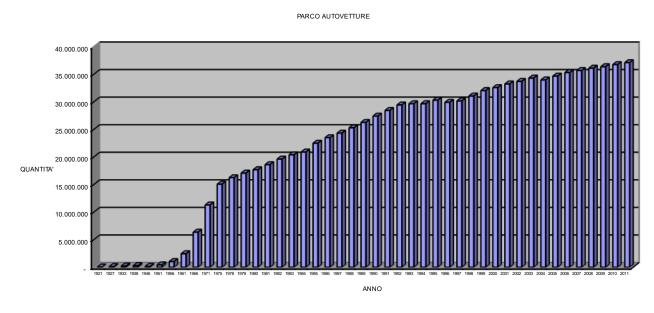


Figura 3.5 - Serie storica aumento parco autovetture²⁴

Un ulteriore fattore che influenza attivamente l'esercizio delle strutture esistenti è rappresentato dal degrado strutturale. Il decadimento di grandi strutture soggette a carichi ciclici e stocastici (oltre a carichi

permanenti) può essere causato da fattori dannosi come: l'invecchiamento, la fatica e la corrosione che deteriorano la capacità resistente dell'elemento integro. Le infrastrutture si deteriorano nel tempo a partire dall'invecchiamento intrinseco dei materiali combinato con crescenti esigenze operative²⁵²⁶; come nel celebre caso del crollo del Point Pleasant Bridge (Figura 3.1) nel 1967 sul fiume Ohio a Pont Plesant in West Virginia²⁷. Tale struttura ebbe un crollo improvviso dovuto ad una frattura fragile di un componente della catena a barre incernierate (Figura 3.7) causata da una cricca di dimensioni non rilevabili che diede inizio alla fessura²⁸.

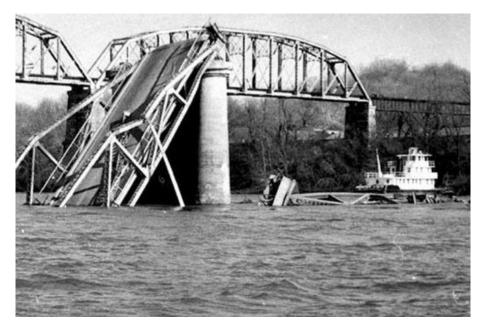


Figura 3.6 - Crollo del ponte Silver Bridge²⁷

Nel corso degli anni, il degrado dovuto all'invecchiamento unito alla corrosione e agli stress da fatica ha portato la cricca a crescere e a diventare una vera e propria fessura che ha causato il collasso statico della struttura. Un fattore fondamentale per il crollo fu l'incremento del traffico negli anni e il peso di auto e camion, che hanno acuito i carichi a fatica, portando al raggiungimento della vita utile della struttura.

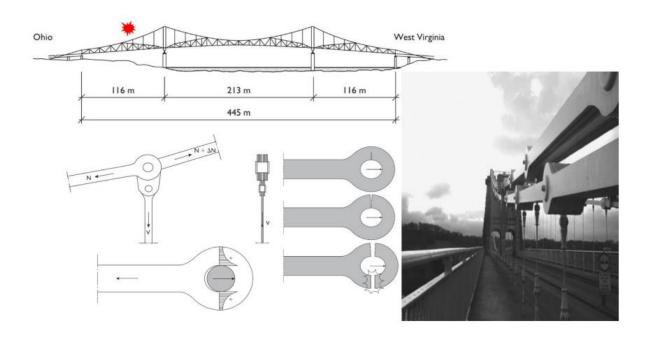


Figura 3.7 - Componente della catena a barre incernierate del ponte Silver Bridge²⁸

Il deterioramento riduce generalmente la flessibilità ed il modulo di Young, del materiale (nello specifico, dell'acciaio), conseguenza si avrà un'influenza anche sui parametri modali globali della struttura come frequenze naturali e modi di vibrare. Come prescritto dalle Linee Guida 2020¹⁹, la pianificazione e l'effettuazione di ispezioni periodiche e straordinarie rappresenta un valido mezzo di indagine dello stato di conservazione dell'opera. Inoltre una metodologia più avanzata e robusta consiste nel monitoraggio strutturale di caratteristiche chiave della struttura, di solito effettuato con i processi Structural Health Monitoring.

3.2.1 Degrado strutturale della fatica

Una delle sollecitazioni che porta un maggiore degrado, soprattutto nelle infrastrutture in acciaio, è la fatica. La fatica come citata nelle norme ASTM²⁹ "è un processo permanente, progressivo e localizzato di evoluzione strutturale in un materiale soggetto a condizioni di tensione e deformazione variabili nel tempo che può portare alla formazione di cricche e/o alla frattura dopo un numero sufficiente di cicli"²⁹.

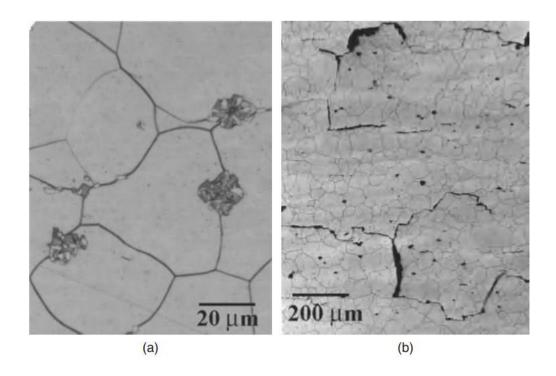


Figura 3.8 - Propagazione microcricca9

Tali azioni, che non sono di intensità tale da portare alla rottura del materiale, portano ad un accumulo del danno che a sua volta può portare ad una crisi di tipo fragile nella struttura. L'acciaio è un materiale che risente particolarmente della fatica nonché è una delle cause di rottura di tali strutture. È un fenomeno che si innesca, dove si hanno picchi di tensione, ad esempio nei pressi delle saldature oppure dove sono presenti fori o intagli nel materiale. In tali punti si possono formare delle micro-cricche che al crescere dei cicli di carico si estendono a delle vere e proprie cricche (Figura 3.8, Figura 3.9). Successivamente, si possono avere delle propagazioni di tali deformazioni plastiche localizzate che portano ad un degrado del materiale, fino ad arrivare a delle vere e proprie dimensioni macroscopiche. Infine quando la propagazione delle cricche è diventata tale da renderle instabili si ha la rottura del materiale³⁰. In aggiunta ai carichi variabili del traffico, che sono la causa principale della fatica, si hanno altri fattori che ne influenzano il fenomeno come: la temperatura, la finitura superficiale del materiale, le dimensioni dell'elemento e l'ambiente in cui si trova^{26,31}.



Figura 3.9 - Crepa della piastra del ponte²⁶

Uno dei principali problemi connessi alla fatica è che i carichi che portano a rottura non sono di intensità tale da essere considerati critici visto il valore molto più basso rispetto alle resistenze massime dei materiali. Questo porta la fatica ad essere uno dei fenomeni più studiati nell'ambito dell'ingegneria civile. La normativa propone una serie di modelli di carico per la progettazione e la verifica basati sulle curve di Wöhler o curve S-N (Figura 3.10). Curve basate su esperimenti e prove in laboratorio sulla fatica, dove si hanno le sollecitazioni S in funzione del numero di cicli N.

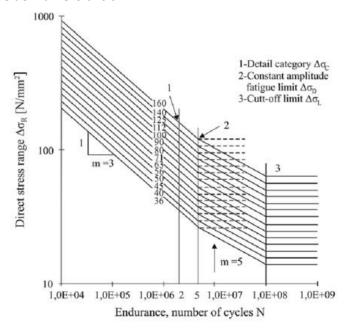


Figura 3.10 – Curve di Wöhler³²

Un altro modello di studio è l'approccio della meccanica della frattura che mette in relazione il propagarsi della cricca con il campo di sollecitazioni che porta all'apice della frattura³⁰. C'è una crescente necessità di metodologie per studiare con accuratezza la fatica e il deterioramento che porta nell'opere. Per questo motivo negli ultimi anni si stanno studiando vari metodi. Uno di questi è il metodo delle strisce finite (finite strip method) dove il ponte viene modellato attraverso delle strisce finite e si utilizzano una serie di autofunzioni per descrivere il profilo delle componenti di spostamento³³. Negli ultimi anni grazie anche al monitoraggio si sono sviluppati nuovi studi come quello di Guo T. e Chen Y. Che, grazie alla tecnologia Weighin-Motion (WIM) molto utilizzata negli USA, hanno sviluppato le distribuzioni di probabilità dei pesi degli assi dei veicoli in movimento³⁴. Oppure come quello di Farreras-Alcover I. Chryssanthopoulos M. e Andersen J. i quali hanno utilizzato i dati ottenuti grazie al monitoraggio per specificare i parametri del modello di serie temporali per i principali fattori di danno da fatica, ovvero le temperature delle pavimentazioni e le intensità di traffico, che influenzano le sollecitazioni variabili nel tempo. Questo per una modellazione indipendente dalla temperatura e dal traffico intenso e per lo sviluppo di modelli con il carico di fatica variabile nel tempo²⁵.

3.3 Il monitoraggio strutturale (SHM)

Il monitoraggio della salute strutturale, (SHM) Structural health monitoring è un processo di attuazione di una strategia autonoma di identificazione dei danni o di eventuali anomalie tramite l'utilizzo di una rete di sensori in concomitanza con un sistema software/hardware per l'analisi dei dati raccolti⁶. Questa tecnica è stata sviluppata nei campi dell'ingegneria aerospaziale e meccanica, ma negli ultimi 20 anni si è estesa anche nell'ambito dell'ingegneria civile, visto soprattutto i tragici eventi avuti in questo settore. A differenza dell'ingegneria meccanica prima e di quella aerospaziale dopo l'applicazione di questo processo non è così scontato per l'ingegneria civile visto la stragrande varietà di opere d'arte che disponiamo sul territorio, nazionale e su scala internazionale. Questo è probabilmente il momento più proficuo per lo sviluppo di sistemi di rilevamento dei danni strutturali poiché le strutture civili, obsolete come i viadotti, vengono utilizzate oltre la loro aspettativa di vita e con sollecitazioni ben differenti dai carichi di progetto originali³⁵. Il monitoraggio strutturale è un'area di ricerca molto attiva con implicazioni tecnologiche per la valutazione delle prestazioni strutturali e l'identificazione del danno durante la vita in esercizio di un'opera. È un processo che mira a migliorare la sicurezza e l'affidabilità stessa della struttura tramite la valutazione delle condizioni operative in tempo reale. Infatti, fornisce un avviso nel caso di condizioni particolari o atipiche, valutando e studiando le condizioni dopo un evento eccezionale come un terremoto o un urto tra veicoli e fornendo informazioni utili per la ristrutturazione dell'opera²¹. Per quanto riguarda il monitoraggio a lungo termine invece si fa riferimento ad un processo di analisi periodiche della capacità dell'opera di continuare a svolgere in maniera efficiente le funzioni per cui è stata progettata tenendo conto dell'inevitabile degrado a cui le infrastrutture civili sono soggette9.

Il monitoraggio che conosciamo oggi, fatto da sensori che rilevano informazioni automaticamente, è definito monitoraggio attivo ed è lo sviluppo di un monitoraggio fatto di prove in sito e ispezioni visive periodiche. Infatti, ancora adesso al monitoraggio attivo si affiancano questi tipi di sondaggi e prove per avere un quadro più completo dello stato dell'opera. Sono però prove che richiedono un gran numero di misurazioni e una successiva catalogazione fatta dall'uomo e non in automatico. Da qui col passare degli anni si sta cercando sempre di più di sviluppare il monitoraggio attivo meno dispendioso per l'uomo, fino ad arrivare ad un vero e proprio monitoraggio intelligente che con l'ausilio di algoritmi, modelli statistici e di soglie per determinati livelli di significatività⁷, sia in grado di estrapolare i dati per il rilevamento dei danni.

Il monitoraggio strutturale, tuttavia, non permette la misurazione diretta del danno, ma consente di capire il tipo di danno e la sua evoluzione nel tempo tramite l'estrazione di informazioni. Il danno può essere definito come mutazione dello stato di una struttura. Detto danno la influenza negativamente quindi per valutarlo servono due configurazioni, una iniziale non danneggiata ed una modificata⁷. Questi cambiamenti possono riguardare: i materiali e le loro proprietà, la geometria stessa, le condizioni di vincolo o più generalmente le condizioni al contorno e portano il sistema a non lavorare più in modo ottimale ed efficiente, oppure nei casi peggiori a delle vere e proprie perdite di funzionalità che possono sfociare nel collasso della struttura. In relazione a questo, si vuole sviluppare tale processo per la comprensione della loro risposta all'andamento del traffico²⁰ e la relazione che intercorre tra questo tipo di carico e il degrado strutturale.



Figura 3.11 – Schema rappresentativo monitoraggio³⁶

3.3.1 Supervised learning e unsupervised learning

La rete di sensori misura un grande numero di informazioni sotto forma di dati che tipicamente vengono acquisiti tramite una centralina il loco e poi trasmessi ad un cloud, dal quale sono resi accessibili da remoto. A questo punto si ha un processo di analisi dati per lo studio delle informazioni ottenute, tale approccio rientra nel campo del machine learning, quindi algoritmi essenziali per apprendere e modellare il comportamento delle opere d'arte. Nel campo dell'intelligenza artificiale ci sono due grandi tipologie di apprendimento, supervised learning e unsupervised learning⁶. Unsupervised learning (Figura 3.13) è un metodo di analisi automatico che nel caso dell'ingegneria civile fa riferimento ad una gamma di dati

provenienti da una struttura non danneggiata e da lì cerca di riconoscere e studiare i dati di input per ottenere dei modelli. Supervised learning (Figura 3.12) invece a differenza del caso precedente dispone di una vasta gamma di dati noti quindi in questo caso si avrebbero delle informazioni in input di una struttura sia ad inizio vita, quindi non danneggiata, che i dati della suddetta opera ma danneggiati. Quindi nelle due configurazioni sopracitate, così che l'algoritmo non debba fare fatica a riconoscere le informazioni, ma possa imparare facilmente da loro. In questo secondo caso, se si ha a disposizione un numero adeguato e rappresentativo di dati della condizione non danneggiata è possibile andare ad allenare l'algoritmo tramite suddetti dati di addestramento. Il problema ricorrente per questo tipo di analisi è che per la maggior parte delle strutture esistenti si possano fornire solo dei dati dell'opera già danneggiata. Tutto ciò ricade nel problema del machine learning di saper riconoscere l'entità del danno di una struttura.

Si hanno due tipi di approcci essenzialmente, model-based e data-based. Il metodo basato sul modello è detto anche problema inverso. Si ha un implemento di un modello fisico tipicamente agli elementi finiti. Ottenuto il modello lo si va ad aggiornare tramite i dati ricavati dalla struttura reale. Questo passaggio permette di ottenere un modello il più possibile conforme alla struttura reale. Così facendo si dispone di un modello attendibile che può essere confrontato con i valori successivi ottenuti dal processo di monitoraggio per andare a vedere se c'è stato un cambiamento nella struttura così da poter rivelare un danno. Il data-based è un approccio basato sui dati, in questo caso è necessario costruire un modello statistico. È un processo che dipende dall'uso di algoritmi appartenenti al unsupervised learning, e quindi utilizza dei dati di addestramento per riconoscere il danno da tutta la gamma di dati che studia⁹.

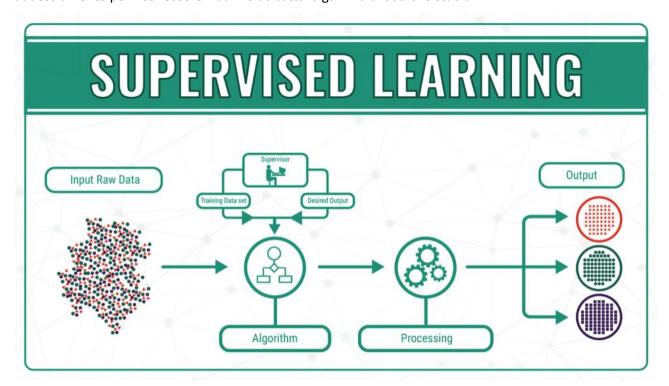


Figura 3.12 - Supervised learning³⁷

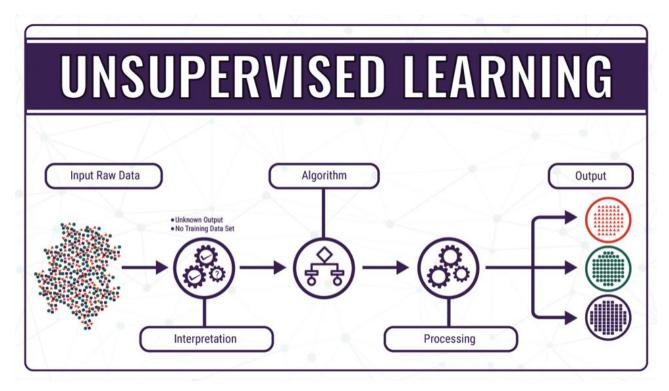


Figura 3.13 - unsupervised learning³⁸

3.3.2 Monitoraggio statico e dinamico

Per quanto riguarda il monitoraggio si può fare una distinzione tra monitoraggio statico e dinamico. Il monitoraggio statico consiste nella misurazione di alcune grandezze, tipicamente spostamenti che possono essere relativi o assoluti, per grandi periodi di tempo con intervalli molto ampi tra una misura e l'altra. Sono sufficienti alcune misure al minuto se non all'ora da parte di sensori come estensimetri elettrici, sensori a fibra ottica o inclinometri per la misurazione di spostamenti, rotazioni o deformazioni come il progredire di una crepa nel calcestruzzo. Il monitoraggio statico permette di andare a correlare tali informazioni ricavate dai sensori con, ad esempio, l'influenza della variazione giornaliera o stagionale della temperatura e le dilatazioni che ne derivano nella struttura, ma non permette di ricavare l'influenza del vento o del traffico sull'opera.

Il monitoraggio dinamico è meno sviluppato in Italia, anche a causa dei costi maggiori, e del maggior impegno computazionale. I dati raccolti sono caratterizzati da una frequenza di campionamento molto elevata. Il campionamento avviene in continuo o, più facilmente, al passare di una certa soglia misurata. Questa tecnica permette di ottimizzare il numero di dati da analizzare, soprattutto nel caso di alte frequenze di campionamento. Dalle informazioni acquisite e tramite il loro studio, si può risalire a parametri modali per valutare il comportamento della struttura dal punto di vista dinamico. I sensori utilizzati per questo tipo di monitoraggio possono essere accelerometri, celle di carico, estensimetri e sensori piezoelettrici, ma sono solo alcuni esempi. Un sistema di monitoraggio dinamico molto efficiente è quello realizzato tramite i sensori weigh-in-motion (WIM) sensori che misurano il carico sull'asse dei veicoli in movimento ma anche la velocità

ed altre grandezze come la geometria del veicolo stesso. La varietà di dati veicolari misurati dai sistemi WIM fornisce una grande quantità di informazioni per il monitoraggio e analisi del traffico²¹.

Un'altra branchia del monitoraggio della salute strutturale, non trattati in questo studio, che si sta sviluppando nell'ultimo periodo è quella dei metodi indiretti iSHM. Un problema del monitoraggio tramite i sensori posizionati in sito è la grande manutenzione che chiedono i vari sensori posizionati lungo tutta l'opera e il costo eccessivo. I metodi indiretti si basano sulla tecnica di sensori montati direttamente sui veicoli che viaggiano sulla struttura, e sono in grado di registrare i segnali dati dalla risposta del ponte durante il tragitto. Questo approccio permette un monitoraggio non fisso con una strumentazione più piccola e variabile ed il vantaggio principale è quello di evitare la fitta schiera di sensori installati su tutta la struttura¹⁸.

4 IL CASO DI STUDIO

Nel seguente capitolo viene descritto dettagliatamente il viadotto oggetto della tesi. Il viadotto di studio è costituito da due strutture paralleli. L'opera è formata da due travate metalliche continue, con impalcato formato da una piastra ortotropa, di tre campate(Figura 4.1 e Figura 4.2). La lunghezza delle campate per la via sud-ovest è di 93.54m, 120m quella centrale e nuovamente 93.54m; mentre quella nord-est è di 76.33m, 120m come la sud-ovest e 83,25m. Sono presenti i due retrotravi entrambe di luce L=1.75m. Il numero di pile è 4, mentre le carreggiate sono 2 con rispettivamente 2 vie di corsa più la corsia d'emergenza. Lunghezza complessiva:

Per la via di Nord-Est: $L_{N-E} = 1.75 + 93.54 + 120 + 93.54 + 1.75 = 310.58 \text{ m}$

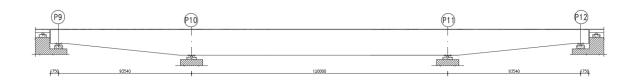


Figura 4.1 - Sezione longitudinale via Nord-Est

Per la via di Sud-Ovest: L_{S-O} = 1.75 + 76.33 + 120 + 83.25 + 1.75 = 283,08 m



Figura 4.2 - Sezione longitudinale via Sud-Ovest

N° conci per la campata Sud-Ovest:

- > 7 per la campata da 83.25m;
- > 11 per la campata da 120m;
- ➢ 6 per la campata da 76.33m.

Mentre per la campata Nord-Est il numero di conci è:

- > 8 per le due campate da 93.54m;
- > 11 per la campata centrale da 120m.



Figura 4.3 - Planimetria viadotto

Per quanto riguarda l'andamento planimetrico, si hanno clotoidi, rettifili e nuovamente clotoidi, per entrambe le carreggiate. È presente un raggio di curvatura che varia da 1200m a 0m con un andamento lineare e successivamente un breve tratto rettilineo dal quale parte l'asse stradale di flesso. In Figura 4.4 viene riportato l'andamento planimetrico.

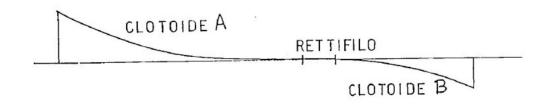


Figura 4.4 - Andamento planimetrico

4.1 Sezione trasversale impalcato

La larghezza totale dell'impalcato è 12.89m, 11.75m riservati alla carreggiata per i veicoli ed i rimanenti 1.14m destinati dalle barriere New Jersey in calcestruzzo. L'impalcato è formato da un cassone metallico con lastra ortotropa. Il cassone alla base misura 6.5m ed un altezza media uguale a 5.5m. I disegni originali del progetto del 1989 da cui sono state tratte le informazioni riportavano la pendenza trasversale, concio per concio. La lunghezza complessiva dell'impalcato è di 12.879m contando due sbalzi ciascuno di 3.195m.

SEZIONE CONCIO CAMPATA LATERALE _ VIA NORD EST e SUD OVEST

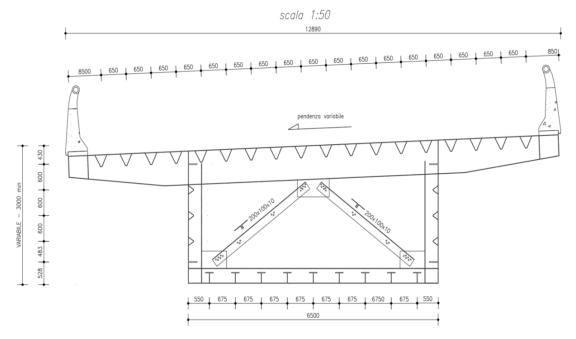


Figura 4.5 - Sezione trasversale B-B viadotto via Nord-Est

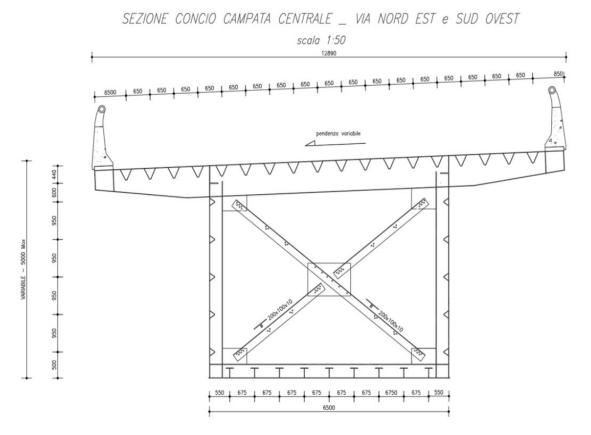


Figura 4.6 - Sezione trasversale A-A viadotto via Nord-Est

SEZIONE CONCIO IN ASSE PILA-9 e PILA-12 VIA NORD EST e SUD OVEST scala 1:50

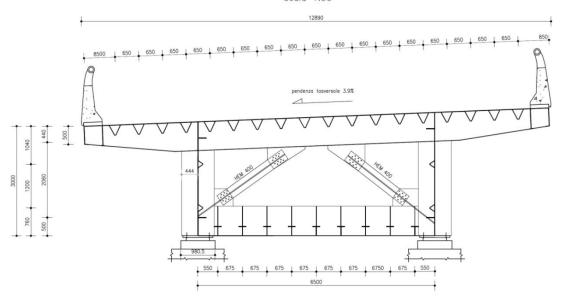


Figura 4.7 - Sezione trasversale C-C viadotto via Nord-Est

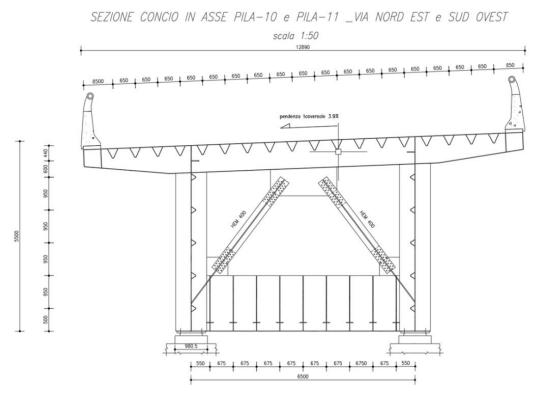


Figura 4.8 - Sezione trasversale C-C viadotto via Nord-Est

Il cassone come struttura è irrigidita sia trasversalmente che longitudinalmente. Trasversalmente attraverso dei diaframmi con interasse di 3m l'uno, muniti alternativamente di crociera. Mentre longitudinalmente mediante due differenti meccanismi irrigidenti, uno per le sezioni laterali del cassone l'altro per le sezioni di base. Per le pareti laterali sono disposte delle sezioni triangolari resistenti a torsione formate da mezze IPE 500. Mentre per la sezione di base, la piastra ortotropa ha bisogno di nervature longitudinali con un interasse

di 0.65m e di travi trasversali ortogonali con un interasse di 3.0m da cui deriva la descrizione ortotropa. Una struttura del genere permette di adoperare schemi a trave continua che, per campate di luce elevata sono più economici rispetto a quelli in semplice appoggio.

Il viadotto è composto da conci rettilinei con una lunghezza che non supera i 12m. Questi conci sono loro volta composti da elementi di larghezza inferiore a quella massima consentita dalla strada: 2.5m circa. Composizione che viene eseguita in cantiere mediante bullonatura ad alta resistenza o saldatura, per quanto riguarda la lamiera d'impalcato così da non creare ingombri con la presenza dei coprigiunti. L'andamento in curva è ottenuto seguendo una poligonale che approssima molto bena l'asse curvilineo teorico grazie alla non eccessiva lunghezza dei conci.

4.2 Sistemi di vincolo

Particolare attenzione è stata rivolta al sistema di vincolo visto che la suddetta opera sorge in zona sismica, tenendo conto che non è possibile scaricare le azioni sismiche longitudinali dell'intera opera sulle travate adiacenti in calcestruzzo armato precompresso. Si è adottato lo stesso sistema di vincolo per i due viadotti, che consente, in caso di sisma, sia i movimenti longitudinali che quelli trasversali.

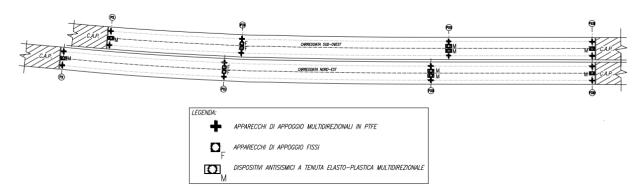


Figura 4.9 - Disposizione sistema di vincolo

4.2.1 Ritegni sismici elastoplastici-multidirezionali

È stato adottato un sistema di "pila per pila" realizzato con dei ritegni elasto-plastici multidirezionali in grado di ridurre abbondantemente le azioni trasmesse dall'impalcato alle pile. Ciò è stato fatto perché non era possibile passare l'intera azione proveniente dall'impalcato alle due pile principali attraverso l'uso di cerniere fisse come vincoli, a causa della modesta altezza delle pile stesse e quindi della loro deformabilità.

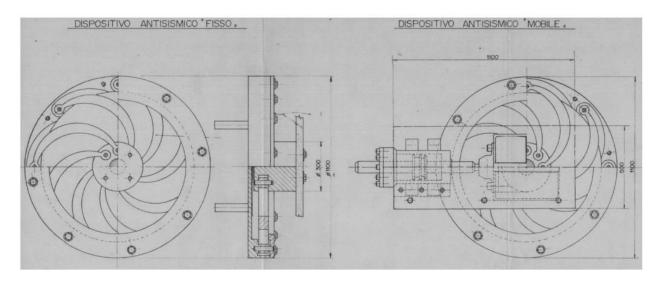


Figura 4.10 - Sezione dei dispositivi antisismici fissi e mobili³⁹

Questi dispositivi con l'aumentare dell'accelerazione agente sulla struttura fungono da isolatori e vanno ad aumentare lo spostamento senza andare ad incrementare la forza trasmessa, anche nel caso di superamento della soglia di plasticizzazione con cui sono stati progettati. In questo caso si suppone un legame costitutivo rigido perfettamente plastico. A tal proposito sulla struttura sono stati predisposti dei giunti in grado di consentire gli spostamenti massimi studiati in fase di progetto così da non apportare danno all'opera stessa. Giunti progettati in modo tale da consentire spostamenti longitudinali ma anche trasversali. Tali spostamenti sono garantiti dai dispositivi di ritegno tramite un meccanismo costituito da un sistema circolare di manovelle radiali bloccate su dei vincoli centrali e periferici, con lo scopo di assorbire le forze agenti in ogni direzione, in campo elastoplastico. Il dispositivo sismico di tipo isteretico, in condizioni di servizio agisce come una guida scorrevole.

5 LAYOUT DI MONITORAGGIO

5.1 Obbiettivo del monitoraggio

Lo scopo di questo monitoraggio consiste nel misurare:

- > Spostamenti longitudinali, tramite 4 dispositivi di appoggio multidirezionali per ogni carreggiata;
- Escursioni termiche, nella zona circostante dell'opera

L'idea è di andare a misurare giornalmente gli spostamenti longitudinali dell'impalcato tramite i sensori disposti sulle pile esterne della strutture e in simultanea misurare l'escursione termica per poi valutare come influisce sugli spostamenti stessi.

5.2 Schema di posizionamento del sistema di monitoraggio

Il sistema utilizzato per il controllo della struttura, Figura 5.1 è formato da:

- n°4 estensimetri elettrici TX2-0025 (trasduttori di posizione lineare di tipo potenziometrico) di capacità=250 [mm], per il monitoraggio di spostamenti longitudinali;
- n°2 sonde termiche NTC installate esclusivamente nella carreggiata Nord-Est;
- n°2 pannelli solari con relativo palo di sostegno montato esternamente al New Jersey, installati esclusivamente in una carreggiata Nord-Est e in prossimità dei box di acquisizione dati per evitare dispersioni elettriche;
- > n°2 box di acquisizione, installati esclusivamente in una carreggiata Nord-Est;
- cavo elettrico per alimentazione dei sensori e del box di acquisizione dati;
- > n° 2 messe a terra dell'impianto di monitoraggio in prossimità dei box di acquisizione dati in carreggiata Nord-Est.

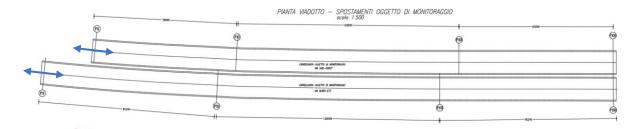


Figura 5.1 - Posizione in pianta dei estensimetri elettrici

Come mostrato in figura si sono utilizzati 4 estensimetri collocati su due appoggi così da avere la possibilità di mediare i valori per avere una misura il più accurata possibile. Verranno definiti successivamente appoggio 1 e appoggio 2.

5.2.1 Convenzione dei segni degli spostamenti

Gli estensimetri posizionati sugli appoggi multidirezionali istallati a loro volta sui baggioli degli appoggi mobili multidirezionali sono dotati di un asse di riferimento x, per gli estensimetri TX_0250 che misurano gli

spostamenti longitudinali (Figura 5.2). L'asse x corrisponde all'asse longitudinale parallelo allo sviluppo del viadotto, ed è coassiale con l'estensimetro come per l'asse y, che corrisponde all'asse di misura in direzione trasversale. Per quanto riguarda i segni si è preso come convenzione spostamenti positivi per i movimenti dell'impalcato che portano i sensori ad aprirsi mentre forniscono spostamenti negativi se lo spostamento induce il sensore a chiudersi rispetto alla posizione neutra in cui è stato istallato. Di seguito in Figura 5.2 è riportato lo schema dell'estensimetro elettronico in posizione neutra.

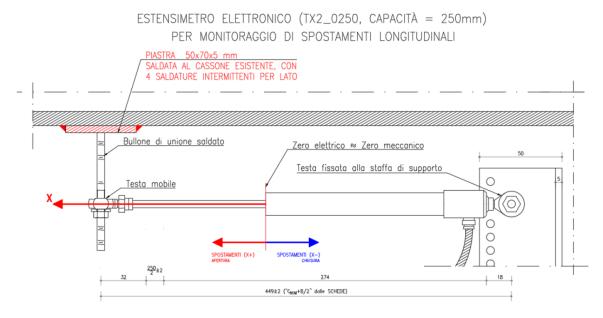


Figura 5.2 Posizione neutra estensimetri elettrici

L'estensione massima del sensore TX2_0250 è di +125mm con una sensibilità di 0.01mm. Nella Figura 5.3 sono riportate in modo schematico le posizioni limite con le rispettive convenzioni di segno, positiva per gli spostamenti in apertura e negativa per quelli in chiusura.

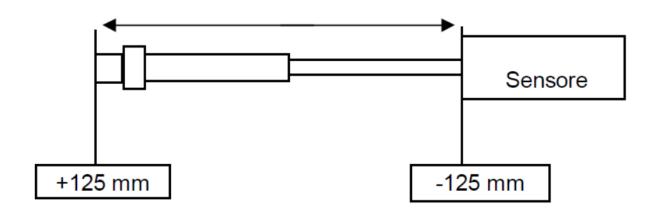


Figura 5.3 - Posizioni limite estensimetri elettrici

Di seguito riportato in Figura 5.4 lo schema della disposizione della sensoristica in pianta dell'impalcato:

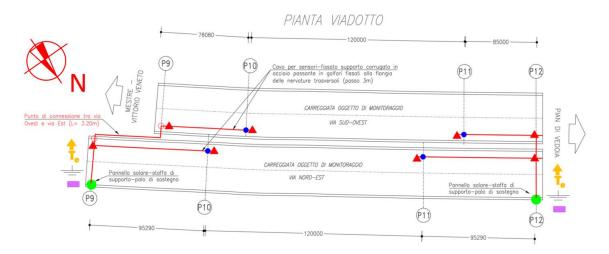
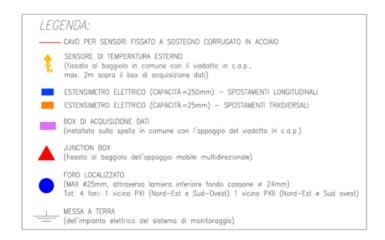


Figura 5.4 - Schema del sistema di monitoraggio in pianta



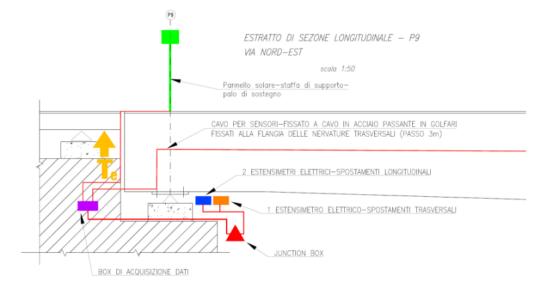


Figura 5.5 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio via NORD-EST – Sezione longitudinale

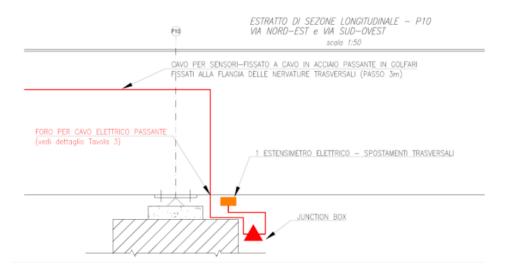


Figura 5.6 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio via NORD-EST e via SUD-OVEST – Sezione longitudinale

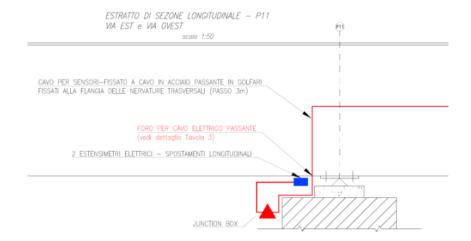


Figura 5.7 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio via NORD-EST e via SUD-OVEST – Sezione longitudinale

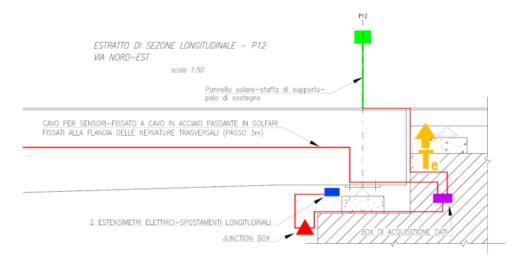


Figura 5.8 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio via NORD-EST – Sezione longitudinale

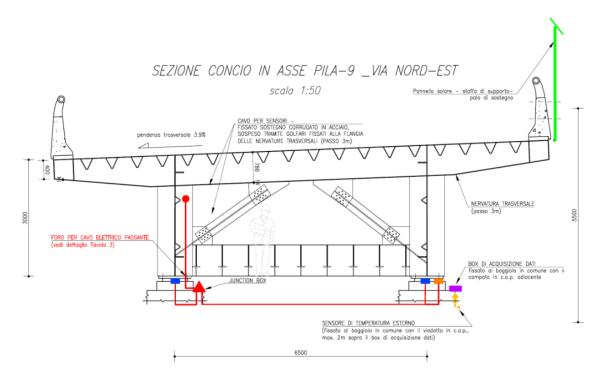


Figura 5.9 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio sezione in asse via Nord-Est

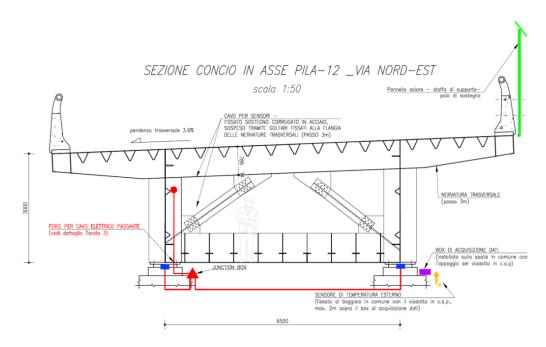


Figura 5.10 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio sezione in asse via Nord-Est

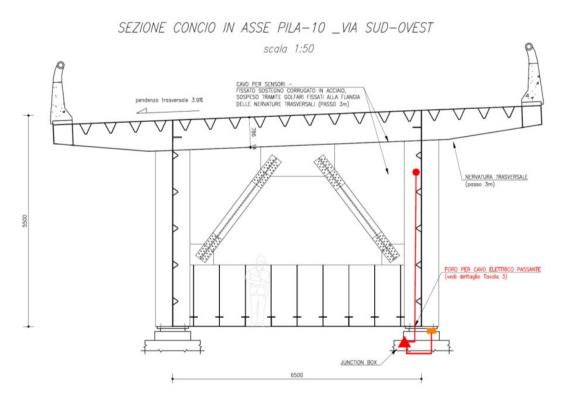


Figura 5.11 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio sezione in asse via Sud-Ovest

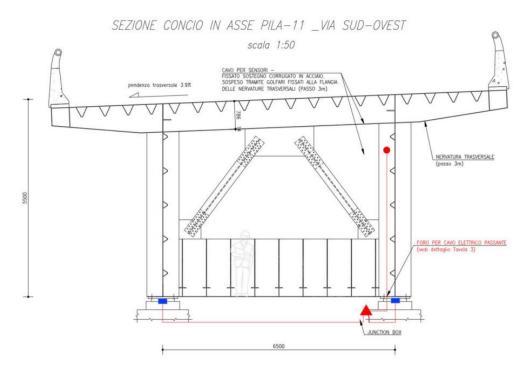


Figura 5.12 - Disposizione degli elementi costituenti il sistema di monitoraggio sezione in asse via Sud-Ovest

5.3 Elementi costituenti il sistema di monitoraggio

5.3.1 Estensimetri elettrici

Per quanto riguarda la misura delle deformazioni si sono applicati degli estensimetri, sensori che possono essere meccanici, acustici ed elettrici. Vengono costruiti con una vasta gamma di configurazioni per adattarsi al meglio alle innumerevoli applicazioni. Per questo tipo di monitoraggio si sono scelti dei trasduttori lineari della classe potenziometrica, assemblati con una testa snodabile (Figura 5.13).



Figura 5.13 - Foto Estensimetro TX2 0250

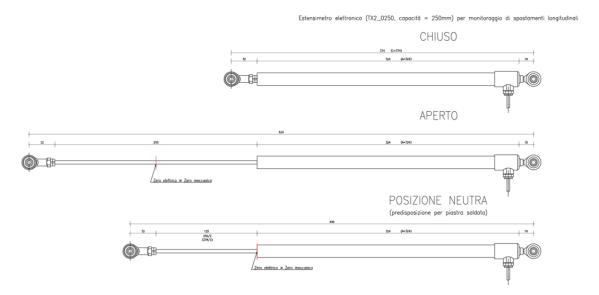


Figura 5.14 - Posizioni notevoli dell'estensimetro TX2_0250, capacità 250mm

Sensori che sia in fase di assemblaggio che in fase di pre-fornitura sono soggetti ad una procedura di taratura. Taratura che avviene tramite la correlazione polinomiale di grado 1 passante per 3 punti derivanti dalla misurazione del potenziale elettrico per le configurazioni limite dell'estensimetro:

- ΔX= +125.0 mm : massima apertura;
- \triangleright $\Delta X = 0.0 \text{ mm}$: posizione neutra (di installazione);

\rightarrow $\Delta X = -125.0 \text{ mm}$: massima chiusura;

5.3.2 Sonda termica NTC

Le misurazioni di temperatura sono spesso usate nel campo delle infrastrutture, sia per la loro facilità di esecuzione sia per l'estrema utilità. Molto utili per la compensazione dell'errore che la variazione di temperatura può portare. Sensori che sono tipicamente istallati in prossimità dello strumento di misura "primario" in modo che possa essere valutata una correzione della deriva causata dal cambiamento della temperatura. Sul mercato sono presenti diversi tipi di sensori per la misura, per questo tipo di sistema si è adoperata una sonda in alluminio ed acciaio inox con supporto per il fissaggio a parete come si vede in Figura 5.15 - Foto sonda termica NTC. La misura delle temperature avviene tramite un termistore NTC da 10k con uno scudo termico formato da un cilindro in alluminio che al contempo ha la funzione di proteggere l'elemento sensibile. La sonda è collegata al dispositivo di acquisizione automatica, o nel caso a lettura diretta, tramite un connettore IP68.



Figura 5.15 - Foto sonda termica NTC

5.3.3 Pannelli fotovoltaici e box centralina

Il sistema è alimentato da due pannelli solari (Figura 5.16) montati in sito tramite un palo di sostegno montato esternamente ai New Jersey. Pannelli montati in prossimità dei box di acquisizione dei dati (Figura 5.17) per evitare dispersione di dati. Si è rivolta particolare attenzione al consumo delle batterie delle centraline.

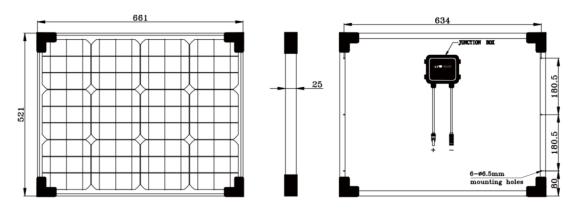


Figura 5.16 - Viste pannello fotovoltaico

Fogli prodotto B04603



Figura 5.17 - Foto box di acquisizione

5.4 Campionamento ed elaborazione dati

Per quanto riguarda il campionamento, i sensori sono stati impostati per prelevare una misura ogni 30 minuti, rendendo il controllo un monitoraggio statico. I sensori sono collegati tramite dei cavi elettrici come si vede in Figura 5.5 a Figura 5.12 ad una centralina di acquisizione. A sua volta la centralina trasmette i dati ad un cloud, il quale rende i dati accessibili da remoto. Da questo momento i dati sono fruibili ma prima di essere utilizzati è necessario eseguire un primo controllo sulla correttezza del dato fornito e verificare la presenza di possibili malfunzionamenti dell'impianto di monitoraggio.

6 METODOLOGIA

In questo capitolo è esposta la metodologia con cui si sono stati studiati i dati ottenuti dai sensori situati sulla struttura. Il problema era studiare questi dati empirici in input per ottenere degli output continui, quindi c'è stata la necessità di passare tramite delle regressioni⁴⁰ e cioè un approccio ad interpolazione e la previsione di quantità continue. Si è passato tramite degli algoritmi sul software Matlab che sfrutta le regressioni Gaussiane per modellare sistemi aleatori. Utilizzando processi Gaussiani che lavorano con variabili aleatorie che hanno una distribuzione di probabilità congiunta gaussiana siamo riusciti a stimare dei valori di output correlati con le informazioni estratte dai sensori. I vantaggi dell'utilizzo di processi gaussiani è che i modelli utilizzati ed il rumore possono essere combinati facilmente tramite operatori matriciali⁴¹ e si riducono notevolmente gli sforzi computazionali rispetto ad altri metodi. Valutando anche che precedenti studi hanno dimostrato che questi modelli forniscono risultati più realistici perché comprendono le fonti di incertezza⁴².

6.1 Regressione Gaussiana

Nell'approccio Bayesiano si definiscono delle coppie formate da un vettore x di dimensione D di input noti, e i rispettivi valori di output in uscita y, target 40 . Si ha quindi l'insieme di tutte le osservazioni, training set: $D=\{(x_i,y_i)|i=1,\dots,n\}$ con n numero di osservazioni. Partendo da questi dati definibili, di addestramento, si vuole ottenere un modello che permetta di fare delle previsioni con l'ausilio di nuovi dati in input x^* che non sono presenti nel vettore (Figura 7.7). Per ottenere questo modello si deve passare dai dati finiti ad una funzione continua. Due tra i metodi più comuni per affrontare questo problema sono: quello di prendere una sola tipologia di classi di funzioni, come per esempio quelle lineari che però potrebbero portare, se non ben modellate a previsioni incomplete. Per risolvere questo problema si potrebbe aumentare la flessibilità di tale classe di funzioni, ma così facendo si potrebbe imbattere in un overfitting, cioè avere un numero di parametri che governano le nostre funzioni troppo elevato rispetto al numero di osservazioni che portano a previsioni errate(Figura 6.1). Oppure il secondo metodo consiste nel dare una probabilità a priori ad ogni funzione studiata, più ci si aspetta siano probabili più avranno una probabilità alta. Considerando le funzioni studiate come vettori molto lunghi la comodità dei processi gaussiani è che se chiedi solo delle proprietà di un numero finito di punti, l'inferenza dei processi gaussiani ti porterà ad avere una risposta identica come se avessi preso in considerazione tutti gli infiniti punti 40 .

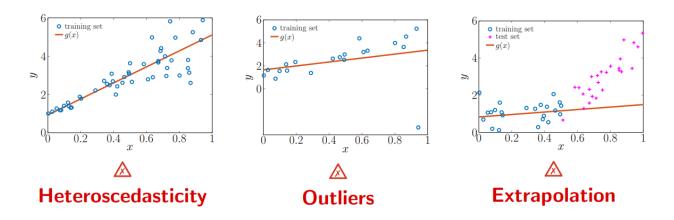


Figura 6.1 - Problemi riscontrati nei modelli di predizione⁴³

Una regressione gaussiana (RG) è una generalizzazione della distribuzione di probabilità gaussiana (Figura 6.2) e può essere completamente identificato dalla sua funzione media: $x \to E[f(x)]$ e dalla funzione di covarianza associata: $k(x,x') = E[(f(x)-m(x))(f(x')-m(x'))]^{41}$.

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \tag{6.1}$$

Tali funzioni sono però difficili da specificare a priori quindi vengono fornite in termini di iperparametri e cioè parametri di una distribuzione di probabilità a priori. Questi iperparametri che controllano la forma delle funzioni del processo gaussiano possono essere stimati utilizzando diversi approcci, tra cui un approccio di massima verosimiglianza o bayesiano, mediante il Machine Learning si possono implementare algoritmi capaci di ricavare i parametri delle funzioni di covarianza.

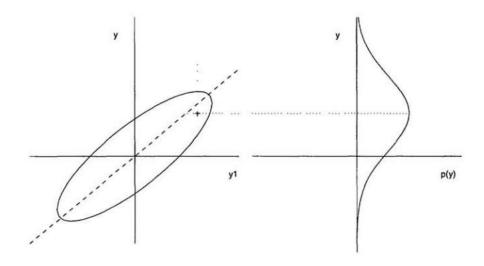


Figura 6.2 - Esempio di una previsione utilizzando un processo gaussiano⁴¹

6.2 Regressione lineare con rumore Gaussiano

Per quanto riguarda l'analisi bayesiana si può utilizzare una regressione lineare con rumore gaussiano:

$$f(x) = x > w \; ; \quad y = f(x) + \varepsilon \tag{6.2}$$

Dove x è sempre il valore di input come y il target, mentre f è il processo reale e w è un vettore di pesi del modello lineare e cioè i parametri. Si assume per il vettore degli errori ε del modello una distribuzione gaussiana indipendente con media zero e varianza σ_n^2 :

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$$
 (6.3)

Modello numerico e il rumore vengono sostituiti dai processi gaussiani con iperparametri che devono essere trovati. L'ipotesi di rumore insieme al modello da origine alla verosimiglianza, cioè la funzione di densità di probabilità condizionata: p(y|X,w). Per le funzioni di verosimiglianza l'inferenza è trattata analiticamente, tuttavia in molti casi le verosimiglianze gaussiane non sono appropriate e metodi di inferenza approssimativi come Expectation Propagation (EP)⁴⁴, L'approssimazione di Laplace (LA) (Williams e Barber, 1998) e i limiti variazionali (VB) (Gibbs e MacKay) diventano necessari (Nickisch e Rasmussen⁴¹).

Combinando la verosimiglianza con le informazioni a priori si forma una nuova distribuzione di probabilità denominata "a posteriori", definita tramite il teorema di Bayes.

$$Posteriori = \frac{Verosimiglianza * Priori}{Verosimiglianza marginale}$$
(6.4)

Dove si trova la verosimiglianza marginale che altro non è una costante di normalizzazione indipendente dai parametri, così facendo si può fattorizzare la distribuzione di probabilità della verosimiglianza:

$$p(y|X,w) = \prod_{i=1}^{n} p(y_i|x_i,w) = \dots = N(X^T w, \sigma_n^2 I)$$
(6.5)

E trascurando i termini che non dipendono dai parametri si può ottenere :

$$p(w|y,X) \propto e^{-\frac{1}{2\sigma_n^2}(y-X^Tw)^T(y-X^Tw)}e^{-\frac{1}{2}w^T\sum_{p=1}^{T}w}$$
 (6.6)

$$p(w|y,X) \propto e^{-\frac{1}{2}(w-\overline{w})^T \left(\frac{1}{\sigma_n^2} X X^T + \sum_{p=1}^{T}\right) (w-\overline{w})}$$
(6.7)

Con
$$\overline{w} = \sigma_n^{-2} (\sigma_n^{-2} X X^T + \sum_{v=1}^{n-1})^{-1} X y.$$
 (6.8)

Raggruppando in una matrice $A=\sigma_n^{-2}XX^T+\sum_p^{-1}$ la distribuzione a posteriori diventa Gaussiana con media \overline{w} e matrice di covarianza A^{-1} :

$$p(w|y,X) \sim N(\overline{w},A^{-1}) \tag{6.9}$$

Per fare una predizione si devono calcolare le medie di tutti i valori che i parametri possono assumere, pesandoli in base alla rispettiva probabilità con cui vengono assunti. Così facendo anche la distribuzione predittiva risulta essere una gaussiana⁴⁰ con media data dalla media a posteriori dei pesi moltiplicati per l'input del test e varianza predittiva con una forma quadratica dell'input del test con matrice di covarianza posteriore, quindi le incertezze predittive aumentano con l'ampiezza dell'input del test. (Figura 6.3)

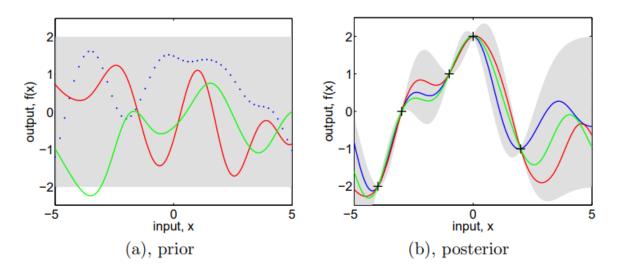


Figura 6.3 - Esempio distribuzione a priori ed a posteriori⁴⁰

Modello lineare che però come detto in precedenza offre un'espressività limitata. Un metodo per superare questo problema è proiettare gli input in uno spazio ad alta dimensione tramite delle funzioni di base. Così facendo si applica il modello lineare in questi spazi ad alta dimensione invece che direttamente sugli input⁴⁰. Se tale proiezione avviene in modo indipendente dei parametri il modello continuerà ad essere lineare. Questo espediente è conosciuto anche come "trucco di kernel" ed è ampiamente utilizzato per collegare linearità con non linearità. Tecnica molto utile quando è più conveniente calcolare il kernel rispetto ai vettori stessi. Tramite una generica funzione $\phi_{(x)}$ che mappa il vettore degli ingressi nello spazio ad N dimensioni, sfruttando l'aggregazione dei vettori generati si può costruire la matrice $\Phi_{(x)}$. così facendo si otterrà il modello:

$$f_{(x)} = \phi_{(x)}^T w \tag{6.10}$$

Con il vettore dei pesi w che ha come dimensione N adesso ed una volta fatte le adeguate sostituzioni la distribuzione predittiva mantiene la stessa forma.

In tal modo si può ottenere un processo gaussiano partendo dal modello Bayesiano:

$$m_{(x)} = \phi_{(x)}^T E[f(w)] = 0$$
 (6.11)

$$k(x, x') = \phi_{(x)}^T E[(f(ww^T))] \phi_{(x')} = \phi_{(x)}^T \sum_p \phi_{(x')}$$
(6.12)

La funzione covarianza o kernel k(x,x') dato che \sum_p è definita positiva ed è possibile scomporla nella forma: $(\sum_p^{\frac{1}{2}})^2$, si può esprimere come un prodotto interno: $k(x,x')=\varphi_{(x)}\varphi_{(x')}$ con la funzione: $\varphi_{(x)}=\sum_p^{\frac{1}{2}}\phi_{(x)}$. Esprimendo così il "trucco di kernel" non è necessario calcolare esplicitamente le finzioni $\varphi_{(x)}$.

6.2.1 Predizioni con rumore

Nella realtà avere delle misurazioni o dei dati senza rumore è praticamente impossibile. Le predizioni partono da dei valori di input noti ma che comunque saranno affetti da rumore, nel nostro caso gaussiano $\varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$. Come detto in precedenza il rumore sarà indipendentemente distribuito così da avere la distribuzione a priori delle osservazioni $y \sim N(0, K(X, X) + \sigma_n^2 I)$. Si può scrivere la distribuzione congiunta

$$\begin{bmatrix} y \\ f * \end{bmatrix} \sim N \left(0, \begin{bmatrix} K(X,X) + \sigma_n^2 I & K(X,X*) \\ K(X*,X) & K(X*,X*) \end{bmatrix} \right)$$
 (6.13)

Di conseguenza derivando la distribuzione condizionale passando dal caso senza rumore studiato da Rasmussen⁴⁰ si otterranno le equazioni predittive chiave per la regressione del processo gaussiano:

$$f * |X *, X, y \sim N(\bar{f} *, cov(f *)) \tag{6.14}$$

Con:

$$\overline{f} * \triangleq E[f * | X *, X, y] = K(X *, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} y, \tag{6.15}$$

$$cov(f*) = K(X*,X*) - K(X*,X)[K(X,X) + \sigma_n^2 I]^{-1}K(X,X*).$$
(6.16)

Nel caso ci sia un solo punto di test x^* si può scrivere $k(x^*)=k^*$ così da evitare le espressioni con K(X, X), $K(X, X^*)$ e $K(X^*, X^*)$ ecc. che possono essere complicate e poco maneggevoli. Con questa notazione compatta si può scrivere l'equazione predittiva:

$$\overline{f} *= K(x *, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} \gamma, \tag{6.17}$$

$$V[f*] = k(x*,x*) - K(x*,X)[K(X,X) + \sigma_n^2 I]^{-1}K(X,x*).$$
(6.18)

La covarianza non dipende dalle uscite osservate ma esclusivamente dagli ingressi. L'equazione del predittore lineare può essere anche studiata come combinazione lineare di n funzioni di kernel o covarianza ciascuna focalizzata su un punto di addestramento:

$$\overline{f} * = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i k(x_i, x_i^*), \text{ con } \alpha = [K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} y.$$
 (6.19)

Quindi per fare predizioni sul singolo punto x^* è sufficiente la distribuzione a n+1 dimensioni definita dal punto stesso e dalle n osservazioni.

6.3 Iperparametri

Le funzioni di covarianza tipicamente hanno alcuni parametri liberi detti iperparametri. Tali parametri vanno a modificare le previsioni sulla regressione gaussiana di turno. Come per i vettori di errore aumentano il loro valore in funzione di quanto i dati in input sono distanti dai punti di addestramento. Modificando questi iperparametri si va a modificare la forma della funzione che si ottiene, visto che la funzione covarianza racchiude i concetti di vicinanza e somiglianza che sono fondamentali, come si vede in Figura 6.4. La

covarianza può essere in generale una qualsiasi funzione in grado di creare una matrice di covarianza che risulta essere non negativa per tutti i gruppi di vettori d'ingresso X.

Alcune proprietà delle funzioni di covarianza sono abbastanza facili da ricavare, come la stazionarietà, ovvero il fatto che sia invariante rispetto alle traslazioni nello spazio degli input, ciò succede se è funzione di x-x'. Mentre per altre proprietà come il valore degli iperparametri si hanno poche informazioni, per quello nel tempo si sono sviluppati metodi per la selezione del modello più adatto.

Esiste una grande variazione all'interno delle singole famiglie di funzioni di covarianza. Ci sono svariate variazioni per la selezione del modello più adatto ma ci sono tre principi di base che si possono seguire:

- o Calcolare la probabilità del modello sulla base dei dati in input
- o Stimare l'errore medio su valori di output non osservati, detto errore di generalizzazione
- Limitare tale errore

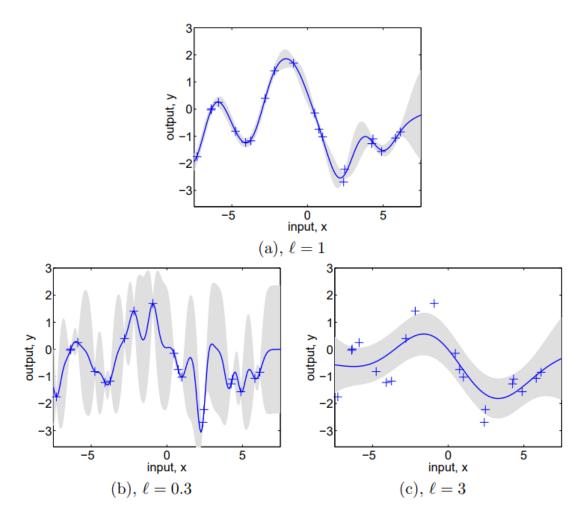


Figura 6.4 - Variazione iperparametri⁴⁰

6.4 Selezione del modello secondo il criterio Bayesiano

Il criterio è basato su una gerarchia a più livelli. Si ha un primo livello, quello più basso dove si hanno i parametrio di un modello lineare nel caso più semplice oppure i pesi di un modello di una rete neurale.

Successivamente si ha il livello degli iperparametri che controllano la distribuzione del livello inferiore dei parametri. L'ultimo è un insieme di possibili strutture da adoperare come modello. La distribuzione a posteriori è governata dalla regola di Bayes:

$$p(w|y,X,\theta,H_i) = \frac{p(y|X,w,H_i)p(w|\theta,H_i)}{p(y|X,\theta,H_i)}$$
(6.20)

Con $p(y|X, w, H_i)$ verosimiglianza e $p(w|\theta, H_i)$ distribuzione di probabilità a priori, insieme danno la distribuzione a posteriori, mentre a denominatore c'è la verosimiglianza marginale usata come costante di normalizzazione visto l'indipendenza dai parametri:

$$p(y|X,\theta,H_i) = \int p(y|X,w,H_i)p(w|\theta,H_i)dw$$
(6.21)

Si procede nello stesso modo passando al livello successivo per esprimere la distribuzione a posteriori sugli iperparametri:

$$p(\theta|y,X,H_i) = \frac{p(y|X,\theta,H_i)p(\theta|H_i)}{p(y|X,H_i)}$$
(6.22)

Con $p(\theta|H_i)$ distribuzione a priori sugli iperparametri e costante di normalizzazione:

$$p(y|X, H_i) = \int p(y|X, \theta, H_i)p(\theta|H_i)d\theta$$
(6.23)

Infine anche nell'ultimo livello si avrà la distribuzione a posteriori, questa volta sui modelli:

$$p(\mathcal{H}_i|y,X) = \frac{p(y|X,\mathcal{H}_i)p(\mathcal{H}_i)}{p(y|X)}$$
(6.24)

Con verosimiglianza marginale:

$$p(y|X) = \sum_{i} p(y|X, H_i)p(H_i)$$
(6.25)

Sommatoria di tutti i modelli presi in considerazione. Questa trattazione adopera parecchi integrali che possono risultare complicati da risolvere, in alcuni casi si ricorre a ad approssimazioni oppure a metodi come quello di Monte Carlo. La verosimiglianza marginale ha la proprietà di includere un bilanciamento automatico tra adeguatezza e complessità del modello quindi in alcuni casi si tende a massimizzarla al posto di utilizzare l'iperparametro a posteriori, solo che questa operazione può portare ad un overfitting soprattutto nel caso in cui sono presenti parecchi iperparametri⁴⁰. Un modello semplice ha un intervallo limitato di possibili insiemi ma in aiuto interviene la verosimiglianza marginale che essendo una distribuzione di probabilità su y si normalizzerà sull'unità e quindi si avranno degli insiemi di dati del modello con una grande probabilità marginale. Viceversa se si ha un modello complicato e quindi una grande quantità di insieme di dati la probabilità marginale non avrà valori così grandi.

6.5 Cross-validation

Il cross-validation (CV) è un metodo per selezionare modelli basato sull'errore di generalizzazione. La base di partenza è l'idea di dividere l'insieme dei dati di training in due parti, la prima, quella più grande utilizzata per l'addestramento vero e proprio mentre la seconda utilizzata per monitorare e convalidare le prestazioni. Durante la fase di monitoraggio viene valutata la qualità dei risultati ricavati e parallelamente si calcola l'errore di generalizzazione, così che da queste misure si possa scegliere il metodo migliore. Questa metodologia ha il problema della gestione dei dati che si hanno a disposizione, nel senso che solo una frazione dei dati disponibili è usata per l'addestramento, oppure se si vuole concedere il più possibile dati per il training allora la stima ottenuta dai pochi dati restanti potrebbe avere una grande varianza. Per evitare questo problema si è sviluppata la strategia k-fold, i dati sono suddivisi in k gruppi disgiunti e di uguale dimensione, l'addestramento viene eseguito per un gruppo alla volta e i restanti k-1 gruppi solo utilizzati per la convalida, il tutto ripetuto k volte. Così facendo si riduce notevolmente la parte di dati non utilizzata per l'addestramento ma al contempo non si rischierà di avere un overfitting.

6.6 Analisi struttura kernel

Tramite l'apprendimento automatico computer ed algoritmi riescono a modellare la realtà senza conoscere le leggi fisiche delle strutture^{6,7}. Lo scopo della struttura kernel è quello di individuare la matrice di covarianza più adatta per modellare la struttura. Sfruttando la regressione gaussiana si pone una distribuzione gaussiana a priori su uno spazio di funzioni infinito-dimensionale.

"According to Mercer's theorem, any continuous, symmetric, and positive semi-definite function that maps (x_i, x_j) onto a high-dimensional feature space can represent a kernel." Come visto prima tramite il "trucco di kernel" ogni osservazione mappata nello spazio di caratteristiche di dimensione $d\varphi$ è definita come una funzione del kernel scalare semidefinita positiva che soddisfa per ogni $x_i, x_j \in X$

$$k(x_i, x_j) = \phi_{(x_i)}^T \phi_{(x_j)} \tag{6.26}$$

Come detto in precedenza definisce un prodotto interno che consente di mappare le osservazioni implicitamente in uno spazio di kernel ad alta dimensione.

Così facendo si può applicare il kernel gaussiano⁴⁶:

$$k(x_i, x_j) = e^{\left[-\frac{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}{2\sigma^2}\right]}$$
(6.27)

Il kernel non lineare scelto definisce implicitamente uno spazio di caratteristiche ad alta dimensione con un parametro di larghezza di banda σ .

6.7 Caso studio Z-24 Bridge di E. Figueiredo e A. Santos⁶

Nel caso di studio del ponte Z-24, un ponte a trave scatolare in calcestruzzo post teso composto da una campata principale di 30m e due campate laterali da 14m (Figura 6.5), E. Figueiredo e A. Santos conducono uno studio sul monitoraggio strutturale prima che il ponte venga demolito.

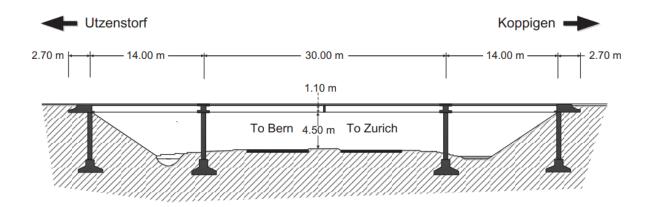


Figura 6.5 - Sezione longitudinale ponte Z-24

È stato effettuato un programma di monitoraggio a lungo termine, per quantificare la variabilità operativa e soprattutto valutare i danni introdotti artificialmente nell'ultimo mese di esercizio. Tramite le misurazioni da parte di accelerometri posti sul ponte sono state studiate le vibrazioni del ponte mentre un'altra serie di sensori misuravano i parametri ambientali. Sono state svolte prove di danneggiamento progressivo ad un mese dalla demolizione con il sistema di monitoraggio ancora attivo, così da convalidare il sistema SHM per il rilevamento di danni cumulativi. Come variabile dipendente in questo studio sono state usate le frequenze naturali del ponte. Le informazioni acquisite durante il monitoraggio a lungo termine, in condizioni non danneggiate, sono state utilizzate come variabile di addestramento del modello.

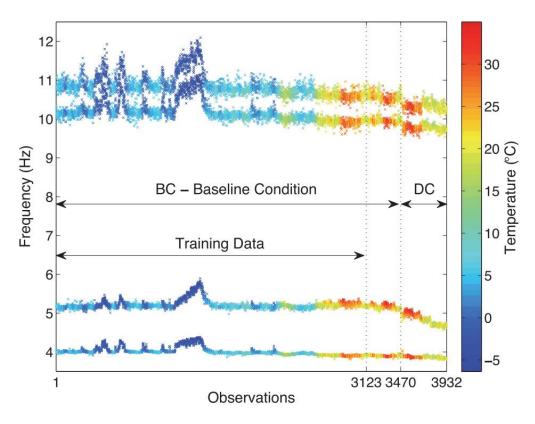


Figura 6.6 - Le prime quattro frequenze naturali del ponte Z-24

Lo studio prosegue con l'applicazione dei diversi algoritmi di apprendimento MSD, GMM, AANN, PCA e KPCA con la soglia di classificazione del danno definita in base ad un valore di probabilità dell'intervallo di previsione del 95% sui dati di addestramento.

Table 3. Damage detection performance for each algorithm.

Algorithm	Type I errors	Type II errors
MSD	162	190
GMM^a	165.45 ± 1.15	8.25 ± 1.89
PCA	161	143
KPCA	172	4
AANN	174	6
GEM - GA^a	166.00 ± 0.00	6.00 ± 0.00
GEM-PSO ^a	166.05 ± 0.22	6.00 ± 0.00

Note: ^aDamage classification performance (average \pm standard deviation) for 20 executions.

Figura 6.7 - prestazioni di classificazione degli algoritmi

La formulazione lineare delle tecniche impatta in una scarsa normalizzazione dei dati e, di conseguenza, in una performance di rilevamento del danno non adeguata. Il picco elevato presentato durante la condizione di base (Figura 6.8) dimostra che la fase di normalizzazione dei dati eseguita, da entrambi gli algoritmi, non può eliminare l'elevata influenza della temperatura sulle frequenze naturali⁶.

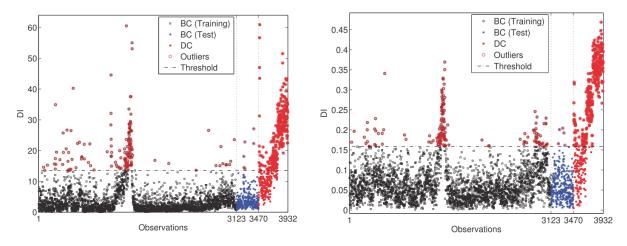


Figura 6.8 – A sinistra modello dell'algoritmo MSD a destra quello PCA

Le prestazioni migliori sono state ottenute quando vengono utilizzati algoritmi non lineari per modellare la relazione non lineare inerente alle caratteristiche sensibili al danno (Figura 6.9). Mappando le osservazioni di addestramento, tramite un kernel non lineare.

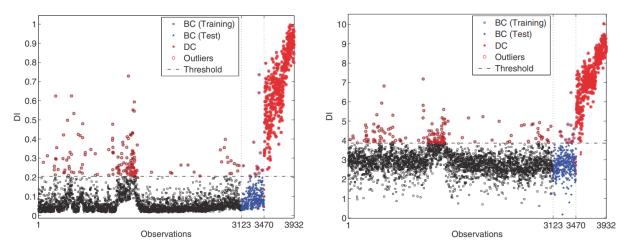


Figura 6.9 – A sinistra modello dell'algoritmo KPCA a destra quello ANN

In un'analisi complessiva, ad eccezione di MSD e PCA, tutti gli algoritmi tentano di mantenere una relazione monotona tra il livello di danno e l'ampiezza dei DI⁶.

7 Analisi dati e discussione risultati

L'obiettivo dello studio è quello di stimare l'impatto del carico di traffico giornaliero passante su un ponte, in termini di rumore di fondo che influisce sulla risposta degli appoggi della struttura. Per ottenere questa stima si è studiato lo spostamento longitudinale dei dispositivi di appoggio del ponte, , apprezzando una correlazione tra la dispersione degli spostamenti a parità di temperatura ambientale ed il passaggio del traffico. I sensori di spostamento posizionati sulla struttura e la sonda termica hanno fornito dati con un campionamento di un dato ogni mezz'ora per un ammontare di 48 dati al giorno e 1488 al mese. Per un ulteriore studio dei dati di monitoraggio sono stati forniti dei dati relativi al traffico veicolare di mezzi leggeri e pesanti nel tratto autostradale in questione.

Durante l'analisi, si effettua una calibrazione del modello matematica tenendo conti di di:

- Funzione di covarianza;
- Parametri dei processi;
- Variabile di input con correlazione;

A partire dai dati di spostamento e temperatura prelevati nel tempo, dopo il pre-processing si è ottenuto l'andamento tramite le regressioni gaussiane (RG). Stesso discorso per quanto riguarda i dati di traffico giornaliero, dopo uno studio ed una suddivisione di questi ultimi. Mediante le regressioni sugli spostamenti si è trovato la dissipazione degli spostamenti utilizzando gli intervalli del rumore di cui sono affetti gli andamenti. Successivamente si è passati a studiare le correlazioni tra le varie grandezze in gioco tramite il coefficiente di Pearson. In primo luogo tra le temperature e gli spostamenti e di seguito tra le dissipazioni degli spostamenti e i valori di traffico suddivisi tra leggero, pesante e totale così da valutare l'impatto più significativo. Per concludere ottenuta la correlazione migliore tra dissipazione degli spostamenti e i valori di traffico sono stati diagrammati in un grafico per vedere l'andamento (Figura 7.1).

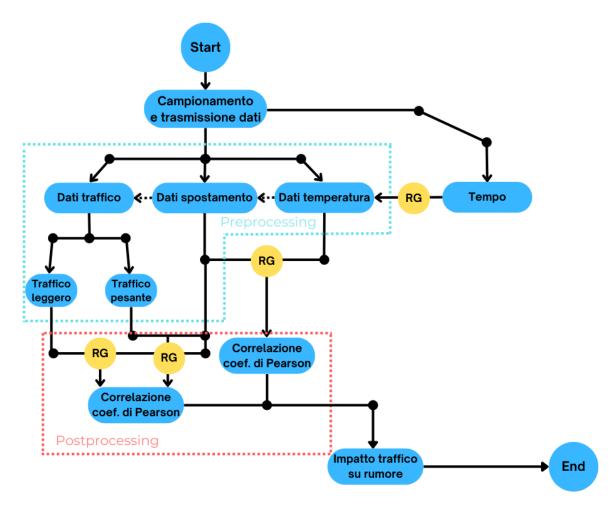


Figura 7.1 – Flowchart analisi dati

7.1 Preprocessing

Una volta scaricati ed ottenuti i dati è necessario eseguire un primo controllo per verificare la presenza di valori che possono significare malfunzionamenti dell'impianto di monitoraggio. Si è quindi valutata la dispersione dei dati raccolti e sono sati identificati e sostituiti i dati che non rispettavano la distribuzione originale.

In merito ai valori di traffico si è passato attraverso una suddivisione dei dati per catalogare meglio il passaggio dei veicoli (Figura $7.3 \div 8.4$). Si è fatta una prima divisione tra giorni feriali e giorni festivi per vedere la diversa incidenza dei veicoli leggeri e pesanti. Successivamente si è ulteriormente suddiviso i valori forniti tra le ore diurne e quelle notturne. Stabilendo come ore notturne dalle 21:00 alle 6:00 lasciando le restanti 14 ore della giornata, dalle 7:00 alle 20:00, come ore diurne.

Sono state quindi analizzate alcune correlazioni tra le grandezze individuate, nello specifico tra:

- Temperatura e tempo;
- Spostamenti e tempo;
- Temperatura e spostamenti;
- > Traffico e tempo;

Spostamenti e traffico;

Le correlazioni sono state quantificate tramite la valutazione del coefficiente di Pearson (7.1), indice che può oscillare tra -1 ed 1.

$$-1 < \rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} < 1 \tag{7.1}$$

- > $0.7 < |\rho_{XY}| < 1.0$: forte correlazione tra le due variabili;
- > $0.3 < |\rho_{XY}| < 0.7$: moderata correlazione tra le due variabili;
- > $0.3 < |\rho_{XY}| < 0.0$: debole correlazione tra le due variabili;

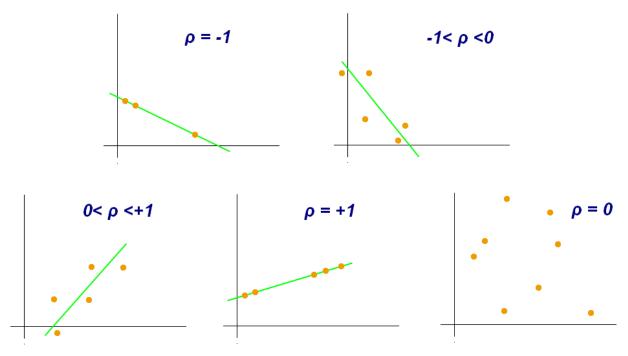


Figura 7.2 – Coefficiente di Pearson⁴⁷

Una volta calibrati i dati in ingresso, è possibile svolgere l'analisi delle informazioni ricavate.

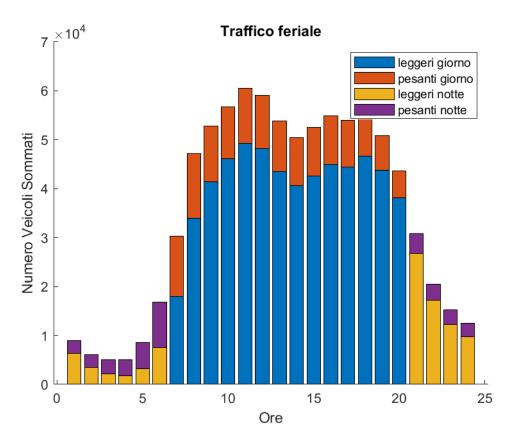


Figura 7.3 – Passaggio veicoli giorni feriali

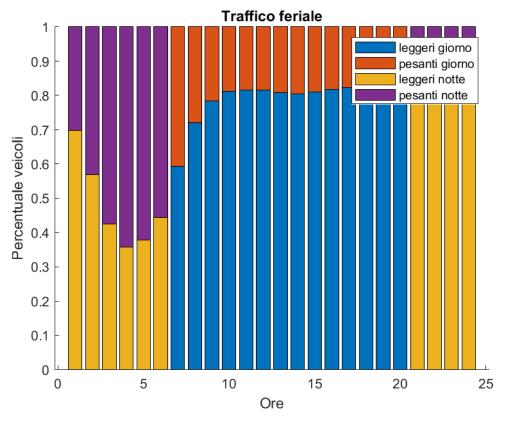


Figura 7.4 - Passaggio veicoli giorni feriali in percentuale

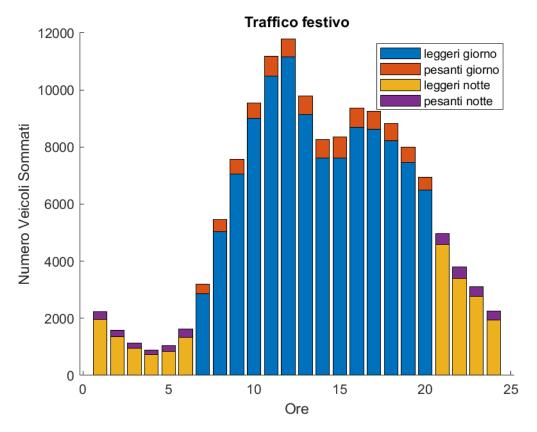


Figura 7.5 - Passaggio veicoli giorni festivi

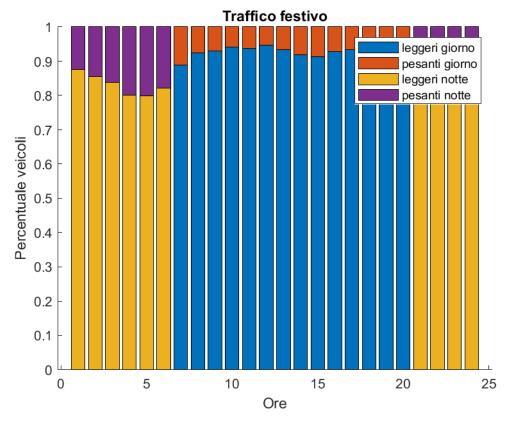


Figura 7.6 - Passaggio veicoli giorni festivi in percentuale

In settimana, traffico feriale (Figura 7.3), la frequenza dei veicoli totali è maggiore rispetto al traffico festivo (Figura 7.5), con una predominanza del traffico leggero rispetto a quello pesante, fatta eccezione per le prime ore della giornata dalle 3:00 alle 6:00. Si possono notare due picchi distinti del traffico in presenza delle ore di punta, uno a metà giornata intorno alle 12:00 e il secondo vero le 17:00, anche se nei giorni feriali questo secondo picco è meno accentuato.

Nelle ore diurne come si può vedere in Figura 7.4 si ha un rapporto costante tra il passaggio di veicoli leggeri e pesanti mentre nelle ore notturne si ha una più alta variabilità.

7.2 Postprocessing

In una prima fase dell'analisi dati vengono correlati gli spostamenti degli apparecchi di appoggio misurati con le variazioni di temperatura apprezzate dalle sonde termiche, considerato il tempo di campionamento e la valutazione del coefficiente di Pearson. Tramite i Processi Gaussiani è possibile effettuare un trattamento dei dati basato su principi statistici (Figura 7.7).

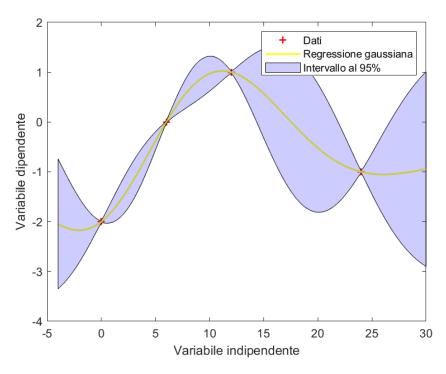


Figura 7.7 – Regressione gaussiana

Per ogni valore di variabile indipendente, vi è il 95% di probabilità di osservare il dato dipendente nell'area verde definita dai processi gaussiani. I processi di Regressione Gaussiana sono estensivamente presentati nel capitolo 6.

7.3 Analisi temperatura - spostamenti

Per questa prima analisi si è voluta ricercare la correlazione tra lo spostamento misurato dagli estensimetri e la temperatura data dalle sonde termiche. La variazione della temperatura avviene su due livelli, quella

giornaliera e quella stagionale. Per questa analisi si è potuto usufruire di un set di dati provenienti da un monitoraggio continuo di un anno, così facendo si è potuta valutare sia l'escursione termica giornaliera che quella annuale (Figura 7.8).

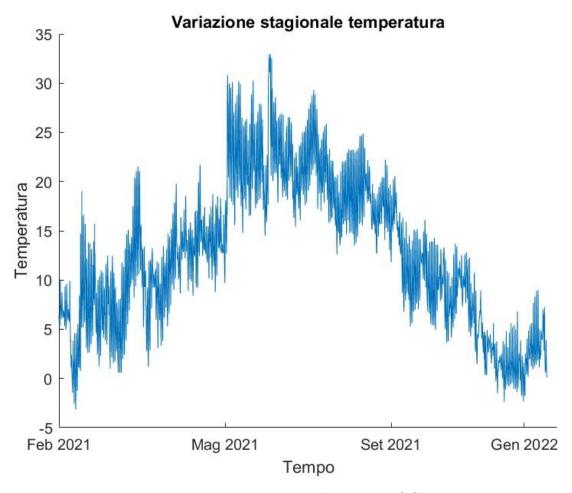


Figura 7.8 – Variazione annuale temperatura [°C]

Il dataset di analisi della variazione termica è dato dai dati raccolti dai sensori nel mese di agosto 2021, dato che la correlazione che andiamo ad apprezzare maggiormente è tra la variazione termica giornaliera e gli spostamenti della struttura. Allo stesso modo sono stati resi disponibili i dati degli spostamenti dei dispositivi di appoggio per un anno di monitoraggio. Le analisi dei due dispositivi di appoggio sono state concentrate anche in questo caso nel mese di agosto. I due dispositivi monitorati saranno successivamente indicati con "Dispositivi 1" e "Dispositivo 2", e gli spostamenti misurati nel tempo sono indicati in Figura 7.9 & Figura 7.10. Per ogni dispositivo, l'analisi è stata condotta sugli spostamenti medi, avendo a disposizione gli spostamenti di due estensimetri per ogni appoggio come mostrato nel capitolo 5.2.

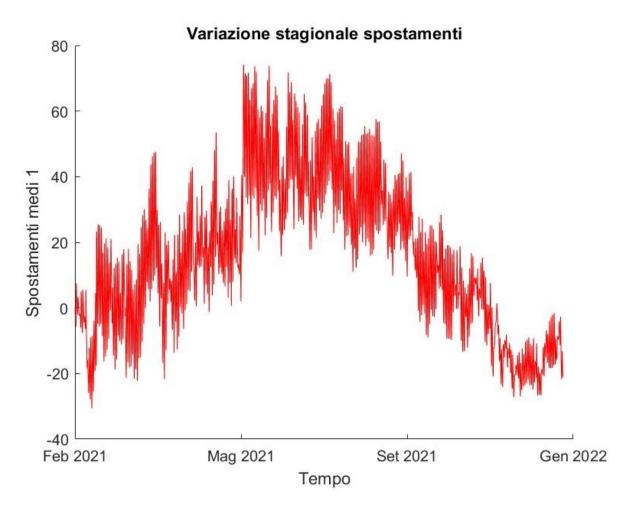


Figura 7.9 - Variazione annuale spostamenti medi 1 [mm]

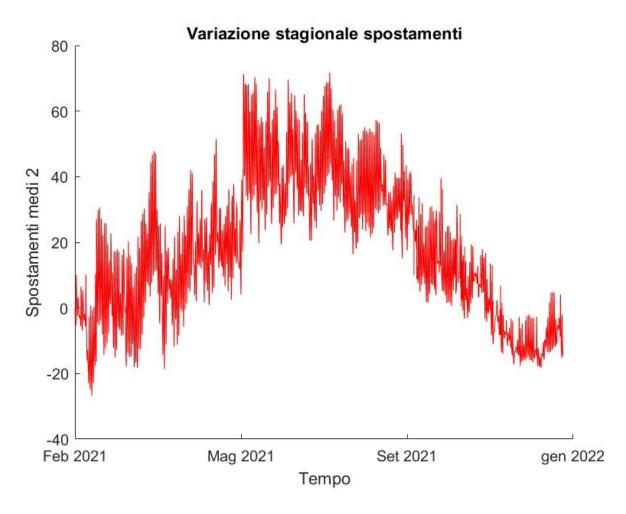


Figura 7.10 - Variazione annuale spostamenti medi 2 [mm]

7.3.1 Regressione temperatura - tempo

Si è studiata la variazione della temperatura su base giornaliera del mese di agosto, osservando un andamento sinusoidale della grandezza (come immaginabile), descritta in Figura 7.11. Per ottenere tale andamento si è dovuti passare da dei dati finiti ad una funzione continua tramite un modello di regressione del processo gaussiano (GPR). Si è presa come variabile indipendente il tempo, sulle 24 ore e come variabili dipendentile temperature, utilizzate come valori di risposta osservati per addestrare il modello GPR, con n numero di osservazioni, in questo caso 1488.

Come funzione di covarianza del modello si è adoperata una funzione di kernel Gaussiani con esponenziale al quadrato⁴⁰.

$$k(x, x'; \theta) = \beta \sigma^2 e^{\left[-\frac{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}{2\sigma^2}\right]}$$
(7.2)

Come metodi di stima dei parametri del modello GPR si poteva adoperare:

- Modello senza nessuna stima, i valori dei parametri iniziali sono utilizzati come valori dei parametri noti:
- Modello con un'esatta regressione del processo gaussiano;
- Modello con un'approssimazione di sottoinsiemi dei punti noti;

- Modello con un'approssimazione di sottoinsiemi di regressioni;
- Modello con un'approssimazione condizionale completamente indipendente.

Per il nostro studio si è scelto un modello con un'esatta regressione del processo gaussiano, così da stimare i coefficienti della funzione di base β , deviazione standard del rumore σ , e parametri del kernel, θ , del modello GPR, memorizzati come vettore di caratteri. Così facendo si è ottenuto un coefficiente beta stimato per le funzioni di base esplicite del valore di 20,287; la deviazione standard del rumore del modello: Sigma=2,476; e la massima verosimiglianza logaritmica marginale del modello uguale a -3.4742e+03.

Così facendo si è ottenuta una funzione continua con n numero di osservazioni nei dati del predittore e gli intervalli di previsione della variabile di risposta, valutati ad ogni osservazione. Il valore dell'intervallo di confidenza è la probabilità che l'intervallo di previsione contenga il valore di risposta vero al 95%, cioè $1-\alpha$ con α =0,05.

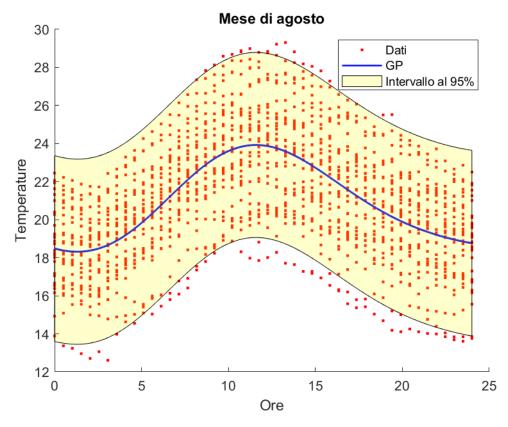


Figura 7.11 - Regressione temperatura tempo [°C]

7.3.1 Regressione spostamenti - tempo e analisi dispersione degli spostamenti

Allo stesso modo si è proseguito con l'analizzare gli spostamenti in corrispondenza delle temperature di agosto. Avendo a disposizione 4 sensori posti sull'opera studiata, due a due in corrispondenza dei 2 appoggi delle pile esterne. Si è deciso di mediare i valori dei due sensori posti sulla stessa pila. Così facendo si è proseguito in modo separato con gli spostamenti a monte dell'opera ed a valle.

Anche in questo caso si è adoperato un modello di regressione del processo gaussiano per ottenere un andamento continuo dai dati puntuali. Per ottenere un'analisi il più congrua possibile si è deciso di utilizzare

la medesima funzione di covarianza del modello e cioè la funzione di kernel Gaussiani con esponenziale al quadrato (7.2). In questo modo adoperando un metodo di stima dei parametri con modello di esatta regressione del processo gaussiano si sono ottenuti:

- β_1 = 37.3502 & β_2 = 39.3339;
- $\sigma_1 = 9.0028 \& \sigma_2 = 8.3822;$
- $\hat{\theta}_1$ = -5.3961e+03 & $\hat{\theta}_2$ = -5.2898e+03;

E con un intervallo di confidenza al 95% si sono ottenuti i seguenti andamenti (Figura 7.12 & Figura 7.13):

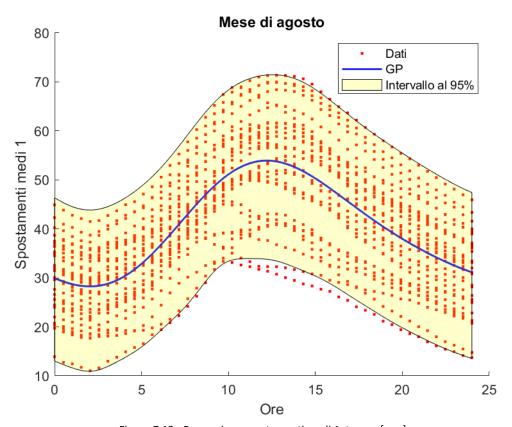


Figura 7.12 - Regressione spostamenti medi 1, tempo [mm]

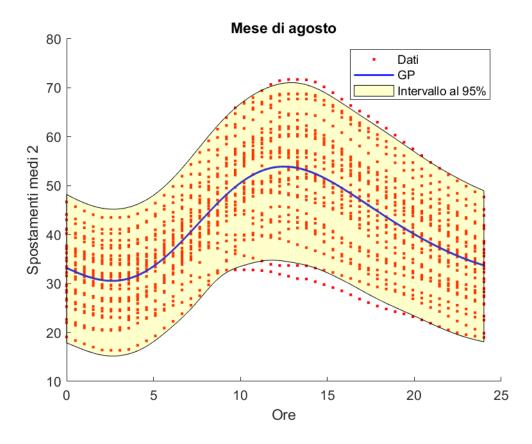


Figura 7.13 - Regressione spostamenti medi 2, tempo [mm]

Si ottiene anche in questo caso un andamento che ricorda quello sinusoidale. Da questo andamento si può ricavare la dispersione di spostamento misurata tra i due sensori posti a valle e a monte dell'opera come funzione continua usando l'intervallo di confidenza al 95% al posto che usare il valore di spostamento massimo e quello minimo puntuale per le differenti ore giornaliere, così da avere una variazione continua su 3000 valori e non solo su 48. Ottenuti questi valori di dispersione di spostamento si possono diagrammare in funzione delle ore del giorno come fatto in precedenza con i dati del traffico così da ottenere Figura 7.14 & Figura 7.15. Questi valori di delta spostamento saranno utili successivamente per studiare la correlazione tra il traffico è la variazione di spostamento dell'opera.

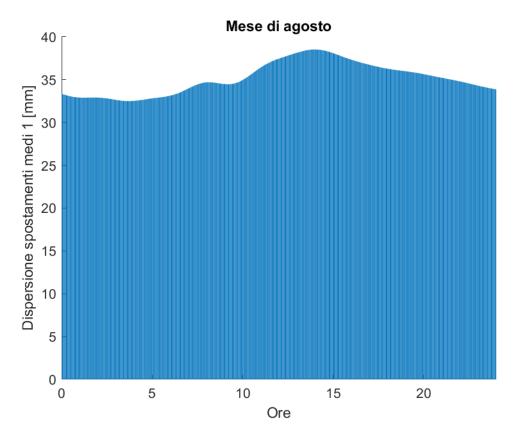


Figura 7.14 -Variazione intervallo di confidenza spostamenti medi 1

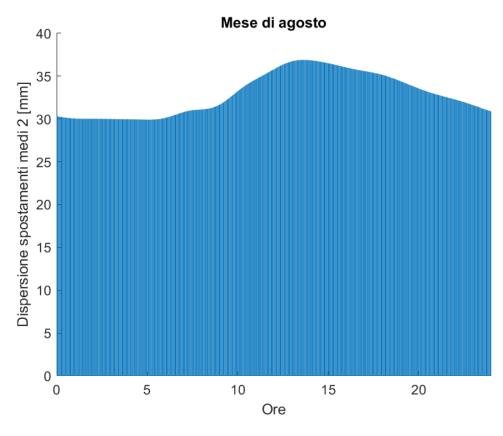


Figura 7.15 - Variazione intervallo di confidenza spostamenti medi 2

7.3.2 Regressione temperatura - spostamenti

A questo punto si è studiata la correlazione tra temperatura e spostamenti. Come spostamenti si sono presi gli spostamenti mediati dei due sensori, rispettivamente a monte e a valle. Per lo studio si sono prese in considerazione come funzione di covarianza del modello la (7.2) funzione di kernel con esponenziale al quadrato e la funzione del kernel con matern con parametro 3/2, definita come:

$$k(x, x'; \theta) = \beta \sigma^2 (1 + \frac{\sqrt{3} \cdot r}{\sigma}) e^{-\frac{\sqrt{3} \cdot r}{\sigma}}$$
(7.3)

Con:
$$r = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}$$
 (7.4)

Si è ottenuta una migliore stima dei parametri tramite la funzione di funzione di kernel Gaussiani con esponenziale al quadrato e quindi si è deciso di operare con essa, ottenendo:

- β_1 = 42.6979 & β_2 = 47.1937;
- \rightarrow $\sigma_1 = 3.5468 \& \sigma_2 = 3.8591;$
- $\hat{\theta}_1$ = -4.0087e+03 & $\hat{\theta}_2$ = -4.1337e+03;

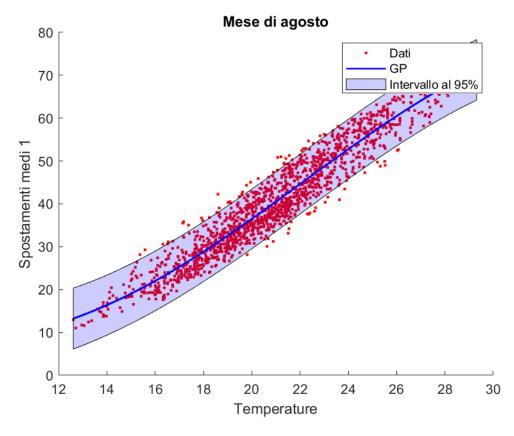


Figura 7.16 – Regressione temperatura [°C] – spostamenti medi 1 [mm]

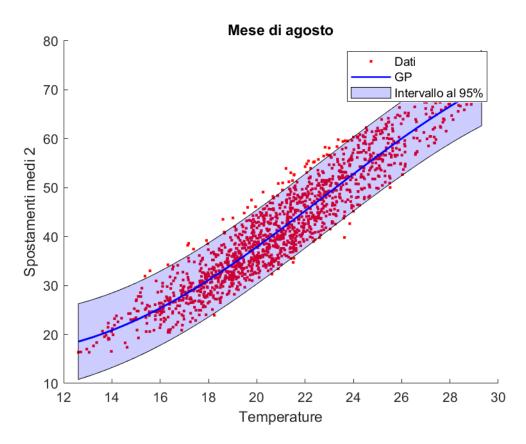


Figura 7.17 - Regressione temperatura [°C] – spostamenti medi 2 [mm]

Come si può vedere dalle due Figura 7.16 & Figura 7.17 si ottiene un andamento piuttosto lineare che presuppone una forte correlazione, confermata successivamente dal coefficiente di Pearson ricavato in un secondo momento ed analizzato nel paragrafo 7.5.

7.4 Analisi traffico leggero e pesante

Per lo studio dei dati relativi al traffico veicolare, dopo aver suddiviso il traffico tra leggero e pesante, sono state analizzate le percentuali di passaggio giornaliere tra ore diurne e notturne nel paragrafo 7.1, si è ricercato il miglior modello che potesse essere messo in correlazione con gli spostamenti della struttura.

Come funzione di covarianza del modello si sono prese in considerazione la (7.2) e la (7.3) funzione del kernel con matern con parametro 3/2 ma anche quella con parametro 5/2, espressa come:

$$k(x, x'; \theta) = \beta \sigma^2 \left(1 + \frac{\sqrt{5} \cdot r}{\sigma} + \frac{5r^2}{3\sigma^2}\right) e^{-\frac{\sqrt{5} \cdot r}{\sigma}}$$
(7.5)

Ed in fine la funzione Kernel quadratico razionale, definita come:

$$k(x, x'; \theta) = \beta \sigma^2 (1 + \frac{r^2}{2\alpha\sigma^2})^{-\alpha}$$
 (7.6)

Con α parametro di mix di scala con valore sempre positivo che determina il peso relativo delle variazioni su larga scala e piccola scala. E il parametro è uguale a come già visto nella (7.4).

La funzione che restituisce la migliore stima dei parametri è quella con kernel con matern con parametro 5/2:

ho β_1 = 476.0021, β_p = 123.4997 & β_t = 590.8148;

- $ightharpoonup \sigma_l = 173.5791$, $\sigma_p = 74.1795 \& \sigma_t = 183.5565$;
- $\hat{\theta}_1$ = -9.8150e+03, $\hat{\theta}_p$ = -8.5419e+03 & $\hat{\theta}_t$ = -9.8987e+03;

Di seguito si riportano gli andamenti delle regressioni del traffico suddivise per traffico leggero Figura 7.18, traffico pesante Figura 7.19 e la somma dei due Figura 7.20.

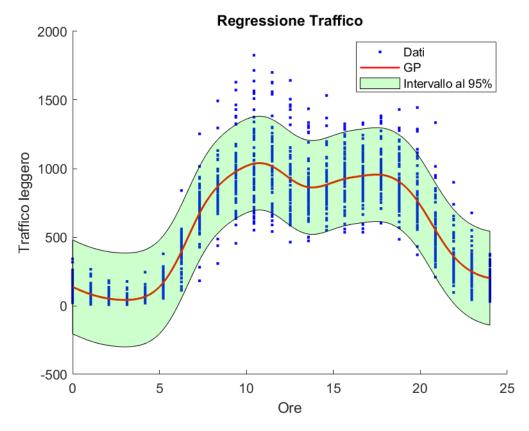


Figura 7.18 - Regressione traffico leggero

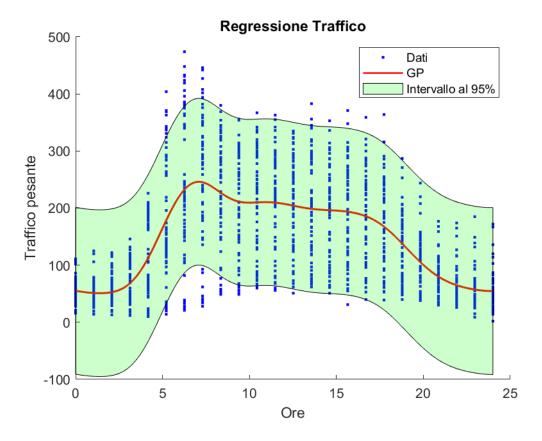


Figura 7.19 - Regressione traffico pesante

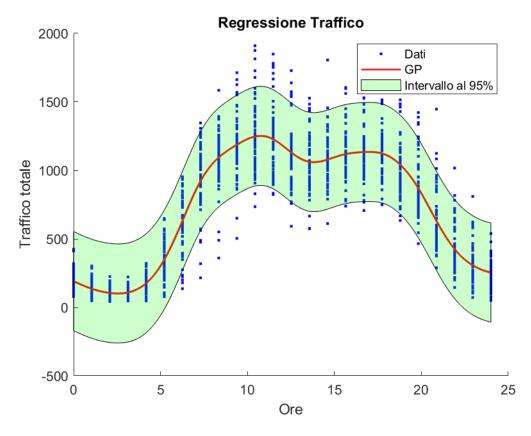


Figura 7.20 - Regressione traffico totale

7.5 Calcolo grado di correlazione con coefficiente di Pearson

Successivamente si è passati a studiare le varie correlazioni. Tramite il coefficiente di Pearson o coefficiente di correlazione lineare si va a studiare la forza della correlazione tra le due grandezze studiate.

La risposta si suddivide in diretta, se il valore restituito dall'analisi è positivo; quindi, la variabile dipendente cresce in maniera direttamente proporzionale alla variabile indipendente oppure indiretta se il valore è negativo, e quindi cresce in modo inversamente proporzionale:

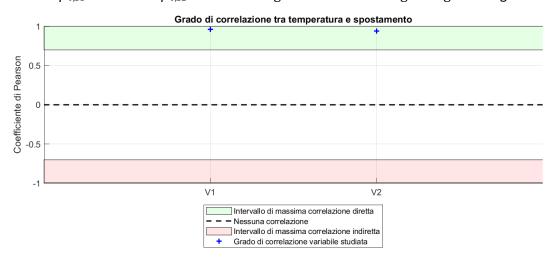
- \triangleright 0.7 < ρ_{XY} < 1.0: forte correlazione diretta tra le due variabili;
- \triangleright 0.0 < ρ_{XY} < 0.7: moderata/debole correlazione diretta tra le due variabili;
- \triangleright -0.7 < ρ_{XY} < 0.0: moderata/debole correlazione indiretta tra le due variabili;
- ► -1.0 < ρ_{XY} < -0.7: forte correlazione indiretta tra le due variabili.

Per quanto riguarda la correlazione tra temperature e spostamenti, come grandezze si sono presi i dati direttamente dai sensori così da correlare le temperature del mese di agosto con i rispettivi spostamenti dell'opera. Quindi si è passati a calcolare le covarianze come media dei prodotti degli scarti e le deviazioni standard:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [x_i - M_{(x)}] [y_i - M_{(y)}]$$
(7.7)

$$\sigma_{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [x_{i} - M_{(x)}]^{2}$$
(7.8)

Ottenute le covarianze delle due variabili e le loro deviazioni standard, si può applicare la (8.1) per calcolare il coefficiente di Pearson. Così facendo si sono ottenuti due coefficienti, tra temperature e spostamenti a valle e a monte: $\rho_{\text{T,S1}} = 0.9586 \& \rho_{\text{T,S2}} = 0.9412$. Diagrammati nell'immagine seguente Figura 7.21.



Per ricercare la correlazione tra il traffico e gli spostamenti a monte ed a valle si è passati tramite gli andamenti ottenuti con le regressioni gaussiane così da avere delle quantità confrontabili viste le diverse grandezze di partenza.

Tramite le covarianze e le deviazioni standard (7.7) e (7.8) si sono calcolate le correlazioni lineari tra gli spostamenti e le varie suddivisioni del traffico tra leggero Figura 7.22, pesante Figura 7.23 e la somma dei due Figura 7.24.

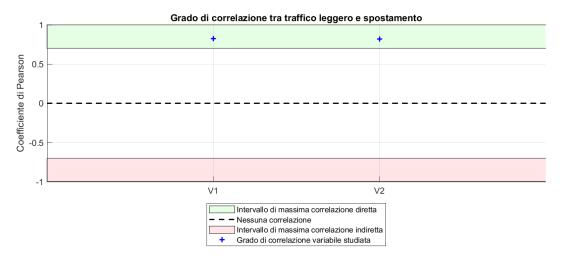


Figura 7.22 - Coefficiente di Pearson, traffico leggero - spostamenti

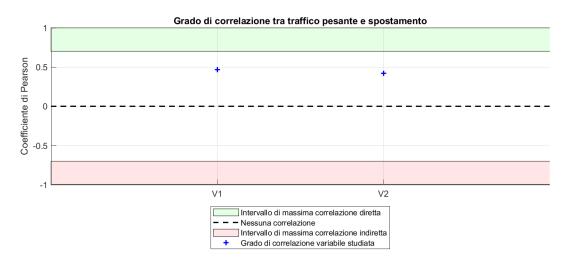


Figura 7.23 - Coefficiente di Pearson, traffico pesante - spostamenti

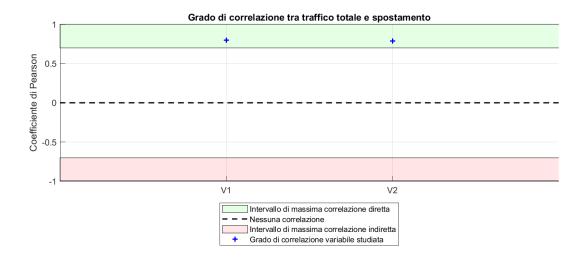


Figura 7.24 - Coefficiente di Pearson, traffico totale – spostamenti

Come si vede già dal grafico, Figura 7.22, la correlazione maggiore con gli spostamenti la si ottiene con il traffico leggero, coefficiente di Pearson:

- $\rho_{\text{TL,S1}} = 0.8254;$
- $\rho_{\text{TL,S2}} = 0.8168.$

Rispetto a quello totale:

- $\rho_{\text{TT.S1}} = 0.7997;$
- $\rho_{\text{TT,S2}} = 0.7854.$

Ma soprattutto con il traffico pesante:

- $\rho_{\text{TP,S1}} = 0.4696;$
- $\rho_{\text{TP,S2}} = 0.4221.$

7.6 Andamento traffico leggero e dispersione degli spostamenti

Come si può vedere nel paragrafo precedente il traffico leggero è quello che mostra una correlazione maggiore con la dispersione degli spostamenti (Figura 7.22), probabilmente visto la Figura 7.4 e la Figura 7.6 questo è dato dal fatto che è nettamente quello più frequente tra i due, anche il traffico totale mostra una correlazione minore dato dal fatto che essendo una combinazione tra quello leggero e quello pesante, il traffico pesante va ad abbassare il grado di diretta correlazione.

Ottenuta quindi questa buona correlazione tra il traffico leggero e la dispersione degli spostamenti si è deciso di proseguire con queste grandezze, andando a diagrammare la dispersione degli spostamenti dei due sensori mediati in funzione dell'andamento del traffico leggero ottenendo la Figura 7.25 e la Figura 7.26.

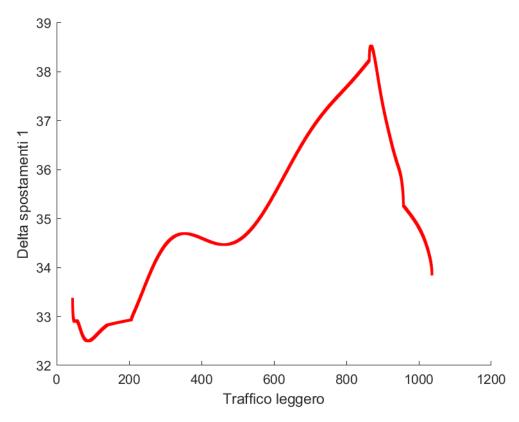


Figura 7.25 - Andamento spostamenti 1[mm] e traffico leggero

Questi grafici ottenuti sono molto interessanti perché mostrano un andamento particolare. Ci si aspettava un grafico con un andamento in continua crescita mentre come si può vedere le figure mostrano un forte cambio di pendenza a seguito di un numero di veicoli, indicativamente intorno ai 900 veicoli circa. Quindi in primo luogo si ha una crescita direttamente proporzionale che si potrebbe approssimare ad una retta, da qui la forte correlazione trovata con Pearson, per poi avere un cambio di direzione.

Si sono ipotizzate diverse possibilità dovute a questo cambio di pendenza, le due che sembrano più affidabili sono entrambe riguardanti gli appoggi e i sistemi di vincolo. La prima è la possibilità di finecorsa dei vincoli quindi con l'aumento del traffico si ha un incremento dello spostamento dei vincoli che però arrivati al loro massimo bloccano gli spostamenti. La seconda possibilità è più interessante riguarda lo sforzo normale sviluppato dai vincoli in risposta al traffico e agli spostamenti. Con l'aumento di questi ultimi si ha un aumento di tale reazione che però arrivata ad un certo valore può portare i vincoli a bloccarsi per il troppo sforzo. Questo meccanismo si può tradurre in un'inefficienza del sistema di vincolo della struttura che dovrebbe permettere di spostarsi fino a fondo corsa ma che con l'aumento dello sforzo normale blocca tale movimento.

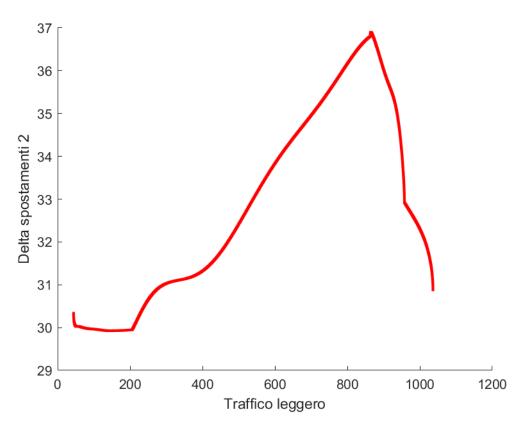


Figura 7.26 - Andamento spostamenti 2[mm] e traffico leggero

In futuro sarebbe interessante poter studiare più a fondo il sistema di vincolo di questa infrastruttura per andare a vedere se effettivamente questo andamento delle dispersioni degli spostamenti è dovuto a qualche meccanismo che si instaura su di essi anche perché sarebbe sinonimo di una possibile inefficienza del sistema di vincolo.

Mediate questa tesi si è vista una minima parte di quello che si può fare tramite il monitoraggio e le possibilità sono infinite, in ogni caso, questo studio è ottimo come database di informazioni, in quanto costituisce una buona base di dati inerenti alla risposta strutturale, anche se come detto ad inizio trattazione le infrastrutture italiane differisco tutte tra loro.

7.7 Sviluppi futuri

Questa tesi ha affrontato l'uso del monitoraggio strutturale per un'analisi dati del traffico e degli spostamenti. Tra i possibili ulteriori sviluppi sarebbe interessante andare a fare un approfondimento sul sistema di vincolo di questa infrastruttura per cercare le motivazioni reali della riduzione di dispersione degli spostamenti, per un alto numero di passaggi di veicoli.

Un altro studio molto interessante potrebbe portare alla definizione di una legge di traffico. Partendo dalla regressione gaussiana del traffico leggero o pesante si potrebbe ricercare la legge che approssima meglio tale andamento, ad esempio una legge sinusoidale. Così facendo si avrebbe una legge di carico associata al reale traffico passante sull'infrastruttura in questione e sarebbe molto interessante andare a modellare l'opera su

un software di calcolo agli elementi fini per apprezzare la risposta del ponte soggetto al reale carico del traffico. Questo tipo di analisi potrebbe essere davvero utile visto che come detto nei primi capitoli di questa tesi, il traffico variabile da traffico agente sulle infrastrutture odierne non è più riconducibile a quello usato per progettarle, in quanto i modelli di traffico utilizzati sono ideali e massimizzano il carico da traffico agente, dal punto di vista statico. .

Un altro studio che si potrebbe condurre con un monitoraggio analogo di strutture simili a quella presentata è un'analisi suddivisa in due parti, la prima sulla struttura reale, e la seconda su una struttura ideale (per esempio un modello agli Elementi Finiti). Mediante un sistema di monitoraggio è possibile andare a vedere la risposta del ponte sotto qualche tipo di sollecitazione, come ad esempio il traffico o il vento o solamente il peso proprio. In concomitanza sviluppare un modello agli elementi finiti della struttura in esame e valutare le risposte ottenute dal software sotto le stesse sollecitazioni studiate nella realtà. Questo per valutare l'accuratezza di entrambe le analisi, vedere quanto il sistema di monitoraggio è avanzato e quanto il software è attendibile.

8 CONCLUSIONI

In questa tesi si è voluto trattare il tema del monitoraggio della salute strutturale (SHM). Dopo una breve introduzione sullo stato dell'arte e sull'evoluzione delle normative italiane relative al monitoraggio strutturale, lo studio sviluppato nella presente ricerca ha portato ad analizzare la risposta strutturale di un viadotto esistente. Gli effetti del traffico e della sollecitazione termica ambientale sull'opera sono stati valutati tramite il monitoraggio in continuo degli spostamenti degli appoggi della struttura.

Si è analizzato il comportamento del ponte tramite un campionamento di un dato ogni 30 minuti, che si è rivelato adeguato ai fini dello studio. In primo luogo, si è studiato l'andamento della temperatura e degli spostamenti durante l'anno, notando come questi avessero degli andamenti proporzionali. Uno studio più accurato a livello giornaliero tramite le regressioni gaussiane ha permesso di ottenere delle funzioni continue, infittendo il database di analisi.

La diretta e forte correlazione che si osserva tra gli spostamenti degli appoggi e la variazione termica ambientale tuttavia presenta anche un rumore di fondo che potrebbe essere dato da svariati fattori, come ad esempio il vento o il traffico.

Infatti, nella seconda parte dell'analisi si è studiato un set di dati del traffico veicolare di mezzi leggeri e pesanti nel tratto autostradale in questione. Si è fatta un'analisi sulla frequenza e la percentuale di questi veicoli, notando che il passaggio di veicoli leggeri è predominante rispetto a quelli pesanti, a parte nella fascia oraria notturna dalle 3:00 alle 6:00 dove in percentuale il traffico pesante è maggiore, superando il 50% del traffico totale. Questo però solamente nei giorni settimanali perché andando a suddividere ulteriormente il traffico tra giorni feriali e festivi si è visto che nei secondi l'impatto del traffico pesante è estremamente inferiore toccando un massimo in percentuale di circa 20% di quello totale. Anche in questo caso si è passati tramite una regressione gaussiana per ottenere una funzione continua. Dopo una attenta calibrazione dell'algoritmo per identificare la migliore funzione di covarianza, si è ottenuta una rappresentazione continua dell'andamento del traffico, suddiviso sempre tra leggero, pesante e totale.

Infine, considerando tutte le varie grandezze in gioco, si è ottenuta una forte correlazione tra gli spostamenti degli appoggi e le variazioni termiche (maggiore dello 0.9); per quanto riguarda il traffico, invece, quello leggero presenta una buona correlazione (coefficiente di Pearson uguale a 0.8 circa), mentre per quello pesante non si è ottenuta alcuna forte correlazione avendo un coefficiente dello 0.4.

In conclusione, l'analisi dell'andamento del traffico è stata direttamente correlata con la dispersione degli spostamenti dell'impalcato. Si è ottenuto un andamento con un una correlazione iniziale che si può riportare ad una funzione lineare seguita da un cambio di pendenza ed ad una inversione della correlazione. Questo è dato presumibilmente dalla risposta degli appoggi della struttura che possono essere arrivati a fine corsa oppure ad un aumento eccessivo dello sforno normale che comporta un blocco degli spostamenti da parte degli appoggi, tradotto in una minor efficienza di questi ultimi.

9 BIBLIOGRAFIA

- 1. AISCAT Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori. Accessed October 28, 2022. https://www.aiscat.it/
- 2. L'Anas: cenni di storia, profili legislativi e aspetti sociorganizzativi. Accessed October 28, 2022. https://www.altalex.com/documents/news/2014/06/23/l-anas-cenni-di-storia-profili-legislativi-e-aspetti-sociorganizzativi#_Toc390339785
- 3. Mappa monitoraggi e sicurezza di ponti e viadotti Autostrade per l'Italia. Accessed October 28, 2022. https://www.autostrade.it/it/tecnologia-sicurezza/sicurezza/mappa-monitoraggi-e-sicurezza-diponti-e-viadotti
- 4. GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA DIREZIONE E REDAZIONE PRESSO IL MINISTERO DELLA GIUSTIZIA-UFFICIO PUBBLICAZIONE LEGGI E DECRETI-VIA ARENULA, 70-00186 ROMA AMMINISTRAZIONE PRESSO L'ISTITUTO POLIGRAFICO E ZECCA DELLO STATO-VIA SALARIA, 691-00138 ROMA-CENTRALINO 06-85081-LIBRERIA DELLO STATO Aggiornamento Delle «Norme Tecniche per Le Costruzioni». Vol 20.; 2018.
- 5. Ponti, viadotti e gallerie | Anas S.p.A. Accessed October 28, 2022. https://www.stradeanas.it/it/lestrade/ponti-viadotti-gallerie
- 6. Figueiredo E, Santos A. *Machine Learning Algorithms for Damage Detection.*; 2018. www.worldscientific.com
- 7. Santos A, Figueiredo E, Silva MFM, Sales CS, Costa JCWA. Machine learning algorithms for damage detection: Kernel-based approaches. *J Sound Vib.* 2016;363:584-599. doi:10.1016/j.jsv.2015.11.008
- 8. Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective Charles R. Farrar, Keith Worden Google Libri. Accessed October 29, 2022. https://books.google.it/books?hl=it&Ir=&id=2w_sp6lersUC&oi=fnd&pg=PP11&dq=Charles+R.Farrar, +Keith+Worden.+%E2%80%9CStructural+Health+Monitoring.+A+Machine+Learning+Perspective%E 2%80%9D.&ots=E3tnzyMtmp&sig=ZpYUclaqYNsXchqXL94OG8QSNmE#v=onepage&q=Charles%20R. Farrar%2C%20Keith%20Worden.%20%E2%80%9CStructural%20Health%20Monitoring.%20A%20Ma chine%20Learning%20Perspective%E2%80%9D.&f=false
- 9. Farrar CR, Worden K. *STRUCTURAL HEALTH MONITORING A MACHINE LEARNING PERSPECTIVE*. www.wiley.com.
- 10. Vittorio Gorresio. Nessuno in Italia controlla i ponti. *La Stampa*. Published online January 20, 1967:1-3.
- 11. Quando nel 1967 crollò il Ponte di Ariccia e i giornali titolavano: "In Italia nessuno controlla i ponti." Accessed September 16, 2022. https://www.ilmamilio.it/c/news/9370-quando-crollo-il-viadotto-di-ariccia-e-i-giornali-titolavano-in-italia-nessuno-controlla-i-ponti.html
- 12. *Circolare Ministeriale, 19 Luglio 1967, n. 6736/61A1.*; 1967.
- 13. *Circolare Ministeriale, 2 Agosto 1980, n. 220977.*; 1980.
- 14. *Circolare Ministeriale, 25 Febbraio 1991, n. 34233.*; 1991.
- 15. Norma UNI, 25 Marzo 2002, n.10985, "Vibrazioni Su Ponti e Viadotti."; 2002.
- 16. Norma UNI/TR, n. 11634 "Linee Guida per Il Monitoraggio Strutturale."; 2016.
- 17. Decreto Legge, 28 Settembre 2018, n. 109, "Disposizioni Urgenti per La Citta" Di Genova, La Sicurezza Della Rete Nazionale Delle Infrastrutture e Dei Trasporti, Gli Eventi Sismici Del 2016 e 2017, Il Lavoro e Le Altre Emergenze"."; 2018.

- 18. Gkoumas K, Gkoktsi K, Bono F, et al. The Way Forward for Indirect Structural Health Monitoring (iSHM)
 Using Connected and Automated Vehicles in Europe. Published online 2021.
 doi:10.3390/infrastructures
- 19. Allegato al Parere Del Consiglio Superiore Dei Lavori Pubblici, 17 Aprile 2020, n. 88/2019, "Linea Guida per La Classificazione e Gestione Del Rischio, La Valutazione Della Sicurezza e Il Monitoraggio Dei Ponti Esistenti".; 2020.
- 20. Golecki T, Gomez F, Carrion J, Spencer BF. Continuous random field representation of stochastic moving loads. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2022;68. doi:10.1016/j.probengmech.2022.103230
- 21. Shokravi H, Shokravi H, Bakhary N, Heidarrezaei M, Koloor SSR, Petrů M. Vehicle-assisted techniques for health monitoring of bridges. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(12):1-29. doi:10.3390/s20123460
- 22. AISCAT Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori. Accessed October 25, 2022. https://www.aiscat.it/
- 23. Roma. Camera Dei Deputati Commissione IX Trasporti, Poste e Comunicazioni PROPOSTE DI LEGGE C24 ED ABB. PER LA RIFORMA DEL CODICE DELLA STRADA AUDIZIONE DEI RAPPRESENTANTI DELL'AISCAT (Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori).; 2019.
- 24. ACI Studi e ricerche Veicoli e mobilità. Accessed October 25, 2022. https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/veicoli-e-mobilita.html
- 25. Farreras-Alcover I, Chryssanthopoulos MK, Andersen JE. Data-based models for fatigue reliability of orthotropic steel bridge decks based on temperature, traffic and strain monitoring. *Int J Fatigue*. 2017;95:104-119. doi:10.1016/j.ijfatigue.2016.09.019
- 26. Peter. Renovation Techniques for Fatigue Cracked Orthotropic Steel Bridge Decks.
- 27. A.G. Lichtenstein HMA. *The Silver Bridge Collapse Recounted. Journal of Performance of Constructed Facilities.* Vol 7.; 1993.
- 28. B. Akesson. *Understanding Bridge Collapses.*; 2008.
- 29. ASTM American Society for Testing and Materials, ANSI/ASTM, E206-72.; 1979.
- 30. Ye XW, Su YH, Han JP. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges. Published online 2014. doi:10.1155/2014/956473
- 31. Bertoncelli Chiarmo Ing Stefano Silvestri CORRELATORE A, Michele Bianchini I. *VERIFICHE A FATICA DI UN PONTE AD ARCO IN ACCIAIO CANDIDATA: RELATORE: II Sessione.*; 2016.
- 32. Wöhler's curves (S-N curves). | Download Scientific Diagram. Accessed September 16, 2022. https://www.researchgate.net/figure/Woehlers-curves-S-N-curves_fig1_257520153
- 33. Cheung MS, Li WC. *Probabilistic Fatigue and Fracture Analyses of Steel Bridges*. www.elsevier.com/locate/strusafe
- 34. Guo T, Chen YW. Field stress/displacement monitoring and fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridge details. *Eng Fail Anal.* 2011;18(1):354-363. doi:10.1016/J.ENGFAILANAL.2010.09.014
- 35. Thesis L. Structural Health Monitoring of Bridges Model-Free Damage Detection Method Using Machine Learning CLÁUDIA NEVES.
- 36. Monitoraggio delle infrastrutture: come prevenire i cedimenti con la IoT. Accessed November 9, 2022. https://www.tenenga.it/monitoraggio-delle-infrastrutture-prevenire-cedimenti-iot/
- 37. Supervised Learning Methods using Python | by Himanshu Singh | Medium. Accessed November 9, 2022. https://medium.com/@himanshuit3036/supervised-learning-methods-using-python-bb85b8c4e0b7
- 38. Unsupervised Learning. Unsupervised learning is a type of... | by Prerna Aditi | Medium. Accessed November 9, 2022. https://aditi22prerna.medium.com/unsupervised-learning-a24caf362e79

- 39. Studio di Ingegneria Civile Prof. Ing. Pietro e Giuseppe Matildi. *Schema Di Vincolo e Dispositivi Antisismici.*; 1989.
- 40. Rasmussen CEdward, Williams CKI. Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press; 2006.
- 41. Williams CKI, Rasmussen CE. Gaussian Processes for Regression.
- 42. Moravej H, Chan THT, Nguyen KD, Jesus A. Vibration-based Bayesian model updating of civil engineering structures applying Gaussian process metamodel. *Advances in Structural Engineering*. 2019;22(16):3487-3502. doi:10.1177/1369433219858723
- 43. Goulet JA. Regression Methods (CIV6540-Probabilistic Machine Learning for Civil Engineers).
- 44. Minka TP. A Family of Algorithms for Approximate Bayesian Inference.; 2001.
- 45. Mercer J. Functions of Positive and Negative Type, and Their Connection the Theory of Integral Equations.; 1909. https://royalsocietypublishing.org/
- 46. Keerthi SS, Lin CJ. Asymptotic Behaviors of Support Vector Machines with Gaussian Kernel.; 2003.
- 47. Ross SM. Introduzione alla statistica. Published online 2014.

10 RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professore Giuseppe Marano e l'ingegnere Davide Masera per la possibilità data di intraprendere questo studio. In particolare vorrei ringraziare l'ingegnere Rebecca Asso per la grande disponibilità e l'estrema gentilezza fornita durante tutto il percorso, difficilmente sarei arrivato alla fine di questo percorso senza la sua presenza.

Alla mia famiglia, ai miei genitori per avermi sostenuto in ogni modo possibile lungo questo percorso di studi ed a mio fratello per la sua costante presenza, so che potrò sempre contare sul tuo aiuto, grazie.

Agli amici di sempre, quelli che ci sono stati, a Edo, Leo, Andre, Simo, Vale ed Ari ed ancora Chiara, Ami, Vale, Giu, Bovve e Marco e per concludere, ultimi ma non per importanza Fede, Cars, Nicco, Aschi. Se sono arrivato qui è sicuramente anche merito vostro.

Un ringraziamento anche ai miei colleghi della Masera Engineering Group, per avermi affiancato durante questo percorso ed in particolare al geometra Antonio Alastra.

Per concludere vorrei ringraziare i miei parenti e tutti gli altri amici che non ho menzionato prima, anche quelli con cui magari ci siamo persi durante il tragitto, grazie a tutti.