

Politecnico di Torino



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Strutture

Tesi di Laurea Magistrale

CORRELAZIONE STATISTICA TRA EFFETTI AMBIENTALI E DATI ACQUISITI SU EDIFICI STORICI DAI SISTEMI DI MONITORAGGIO STRUTTURALE

Relatore Prof. Ing. Rosario Ceravolo

Candidata Fabiana Palma

Correlatori Ing. Giorgia Coletta

Ing. Gaetano Miraglia

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

*Non giudicatemi per i miei successi
ma per tutte quelle volte che sono caduto
e sono riuscito a rialzarmi.
(Nelson Mandela)*

Sommario

1. Introduzione	7
2. Structural Health Monitoring	9
2.1 Definizione di SHM e campi di applicazione	9
2.2 SHM e il patrimonio architettonico.....	12
2.3 Fasi del monitoraggio strutturale.....	14
2.4 Condizioni operative ed ambientali e l'identificazione del danno	17
3. La Basilica Regina Montis Regalis di Vicoforte (CN).....	19
3.1 La storia del Santuario.....	19
3.2 Quadro fessurativo, indagini ed interventi	24
3.2.1 Nuovo sistema di cerchiaggio.....	27
3.2.2 Campagne di indagine	28
3.3 I sistemi di monitoraggio.....	32
3.3.1 Il sistema di monitoraggio statico.....	32
3.3.2 Il sistema di monitoraggio dinamico	42
4. Identificazione dinamica lineare	47
4.1 Teoria dell' identificazione dinamica.....	47
4.1.1 Principali tecniche di identificazione	50
4.2 Cenni sulla tecnica SSI (Stochastic Subspace Identification)	52
4.2.1 Introduzione del modello spaziale: dal continuo al discreto.....	53
4.2.2 Predizione e Stati di Kalman	55
4.2.3 Estrazione dei parametri modali	56
4.3 Procedura di identificazione modale automatica per il Santuario di Vicoforte.....	58
4.3.1 Selezione dati di input ed influenza fattori operativi.....	59
4.3.2 Procedura SSI	60
4.3.3 Eliminazione modi spuri.....	60
4.3.4 Analisi dei cluster	62
4.3.5 Definizione parametri modali	63

4.4 Procedura di identificazione applicata considerando la terna di base	64
5. Influenza agenti esterni	71
5.1 Dati ambientali ARPA Piemonte	71
5.2 Dati sperimentali dei sistemi di monitoraggio statico e dinamico	77
5.3 Correlazioni tra i dati a disposizione	82
5.3.1 Principal Componente Analysis (PCA).....	82
5.3.2 Modelli di regressione e analisi di correlazione	86
5.4 Influenza del terreno sulle frequenze	122
5.4.1 Approccio sperimentale.....	122
5.4.2 Approccio numerico	124
6. Applicazione al Damage Detection.....	127
6.1 Cointegrazione e tecniche di machine learning per l'identificazione del danno strutturale	127
6.2 Miglioramento indicatore di danno a partire dai dati raccolti	129
6.2.1 Effetto della temperatura interna	129
6.2.3 Effetto della tensione nelle barre del sistema di cerchiaggio.....	132
6.2.4 Effetto combinato della tensione nelle barre e della temperatura.....	134
7. Conclusioni	137
Indice figure	141
Bibliografia	147
Ringraziamenti	149

1. Introduzione

Il crescente interesse nella salvaguardia e nella tutela del patrimonio architettonico ha incentivato, soprattutto negli ultimi decenni, lo sviluppo di moderne tecniche di monitoraggio strutturale. Come si può facilmente immaginare, è molto complesso definire con esattezza il comportamento di edifici storici a partire dai risultati di prove standard, a causa dell'incertezza riguardo alle proprietà dei materiali, al loro stato attuale e alle tecniche di costruzione impiegate. In luce di questo, monitorare lo stato di salute di una struttura si rivela assai utile sia per valutarne la condizione di conservazione da cui partire per progettare gli interventi in modo mirato, ma anche per averne un chiaro quadro clinico a seguito di eventi improvvisi come i terremoti.

Innovative tecniche nell'ambito dello Structural Health Monitoring (SHM) [1] prevedono lo studio e l'analisi dei segnali accelerometrici tramite strumenti statistici e algoritmi di machine learning. Essi mirano a prevedere la risposta futura del sistema e identificare in tempo reale l'eventuale comparsa di un danno, la tipologia, l'entità e la posizione. Quando si lavora su beni architettonici, tali tecniche sono particolarmente apprezzate in quanto si rivelano praticamente non invasive e, grazie al livello di conoscenza che ne deriva, portano al rispetto del principio di minimo intervento introdotto nelle linee guida dell'ICOMOS.

In questo scenario in cui l'attenzione verso l'indagine dello stato di conservazione di beni architettonici è in continuo aumento, si colloca la Basilica "Regina Montis Regalis" situata nella cittadina di Vicoforte (CN). Il Santuario di Vicoforte, con la sua cupola ovale più grande al mondo, è un caso unico in quanto a complessità ed importanza nel quadro dei Beni Culturali Italiani ed è un perfetto caso studio in quanto dotato sia di un sistema di monitoraggio permanente statico che dinamico.



Figura 1 Vista prospettica della Basilica Regina Montis Regalis di Vicoforte(CN)

Secondo le sopracitate tecniche, l'individuazione della comparsa di un danno si basa sul rilevamento di variazioni sospette nell'andamento delle frequenze strutturali nel tempo. Tuttavia, oltre ai danneggiamenti, anche vari fattori ambientali e operativi (EOVs), seppur innocui e reversibili, influenzano i dati registrati sulla struttura e risulta pertanto importante distinguerli per non incorrere in diagnosi errate. Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di realizzare uno studio sistematico di tutti i possibili agenti che condizionano le vibrazioni del Santuario di Vicoforte, indagandone le eventuali correlazioni e dipendenze. La ricerca passa attraverso la raccolta e l'analisi di dati di natura eterogenea, dalle misure di temperatura all'altezza di pioggia, dalla forza nelle celle di carico ai segnali accelerometrici, etc. In ultima analisi, sulla base delle relazioni scoperte tra i dati, si è visto come questa conoscenza possa essere d'aiuto nell'ambito del damage detection, applicando i risultati a delle tecniche note in letteratura [2].



Figura 2 Interno della cupola ovale più grande al mondo situata presso la Basilica di Vicoforte

Il presente elaborato vuole illustrare il lavoro svolto ed è così strutturato : il capitolo 1 si focalizza sullo Structural Health Monitoring, le sue fasi e la sua applicazione al patrimonio architettonico; il capitolo 2 è una panoramica sul caso studio del Santuario di Vicoforte, la sua storia, le indagini pregresse, gli interventi e i suoi sistemi di monitoraggio; il capitolo 3 si concentra sulla tecnica di identificazione dinamica dei segnali registrati dal sistema di monitoraggio dinamico; l'influenza degli agenti esterni sul comportamento della struttura è l'elemento protagonista del capitolo 4, in particolare l'analisi di regressione dei dati raccolti; nel capitolo 5 ci si pone l'obiettivo di applicare i risultati ottenuti al fine di migliorare il metodo di damage detection del santuario. L'elaborato si conclude con un'analisi dei risultati ottenuti dal lavoro svolto.

2. Structural Health Monitoring

2.1 Definizione di SHM e campi di applicazione

La descrizione dell'ambito dello Structural Health Monitoring (SHM) parte dalla definizione del concetto di danneggiamento. Una struttura si definisce danneggiata quando subisce un cambiamento che può coinvolgere diversi aspetti, quali i materiali, le proprietà geometriche o anche le condizioni al contorno, al punto da andare ad inficiare le prestazioni della struttura stessa. Da questa definizione sembra quindi evidente come l'identificazione del danno necessiti di un confronto, tra quella che è considerata la condizione iniziale e quella che invece è la condizione nel momento in cui si crede sia intervenuto il danneggiamento della struttura. La strategia di identificazione del danno, utilizzata in campo aerospaziale, meccanico e civile, è nota quindi come Structural Health Monitoring, la quale si avvale dell'osservazione della struttura e dell'analisi statistica delle caratteristiche sensibili all'effetto del danno.

L'identificazione del danneggiamento è un settore in continuo sviluppo che procede attraverso 5 diverse discipline che collaborano tra loro. Allo SHM si aggiunge: condition monitoring (CM), non-destructive evaluation (NDE), statistical process control (SPC), e damage prognosis (DP). Queste tecniche permettono, affiancando la SHM in specifici settori, o sopperendo alle lacune, l'investigazione e l'identificazione del danno [3].

Come ampiamente esposto da Farrar e Worden [2], è possibile parlare di assiomi dello Structural Health Monitoring, vale a dire le verità fondamentali per comprendere la procedura. Queste però non pretendono di essere le sole nozioni alla base di questa tecnologia, in grado di attirare ampiamente l'attenzione negli ultimi 20 anni, né specificano gli aspetti tecnici legati all'utilizzo degli algoritmi utilizzati, dal campo della statistica fino al machine learning.

Ecco enunciati e brevemente spiegati gli assiomi di SHM.

Assioma I. Tutti i materiali hanno difetti ed imperfezioni intrinseche.

La presenza intrinseca di difetti nei materiali deve essere sempre presa in considerazione nella fase di definizione del danno e non deve essere confusa con quest'ultimo. Il danno è presente quando la struttura non opera più nella sua condizione ideale, anche se svolge ancora la sua funzione e il collasso non è ancora avvenuto. Prendere in considerazione la presenza intrinseca di difetti dei materiali, spesso responsabili del collasso, permette di creare una struttura in grado di resistere al danno. Il monitoraggio della struttura permette di avere sentore dell'evoluzione della vita della stessa attraverso le sue fasi.

Assioma II. La definizione del danno richiede il confronto tra due stati del sistema.

Il monitoraggio strutturale in continuo permette di avere una visione della struttura nella sua condizione ideale e quindi non danneggiata, a cui vengono riferiti tutti i parametri la cui variazione viene utilizzata come strumento per identificare il danno.

Assioma III. L'identificazione della presenza e la posizione del danno può avvenire tramite le tecniche di Unsupervised Learning, ma l'identificazione del tipo di danno presente e della sua gravità solo attraverso quelle di Supervised Learning.

Le tecniche di Supervised Learning vengono applicate quando sono disponibili dati relativi alla struttura danneggiata e alla struttura in condizioni non danneggiata, come gli algoritmi alla base delle tecniche di regressione; al contrario gli algoritmi che vengono applicati a dati non riferiti alla struttura danneggiata costituiscono il gruppo di Unsupervised Learning.

Assioma IVa. I sensori non possono misurare il danno; è necessario estrarre delle proprietà attraverso fasi di processamento dei segnali e analisi statistiche per convertire i dati dei sensori in informazioni di danno.

I dati raccolti dai sensori non sono indicativi del danno, ma sono proporzionali ad un parametro che risente della presenza del danno, come nel caso di accelerazioni e frequenze. Le fasi di training data, l'utilizzo di tecniche come la PCA, e di tecniche elaborazione dei dati come l'identificazione dinamica, sono fondamentali per l'elaborazione dei dati.

Assioma IVb. Senza un'estrazione intelligente dei parametri, più una misura è sensibile al danno, più è sensibile ai fattori ambientali ed operativi.

Questo è l'assioma che meglio permette di descrivere per il presente lavoro, in quanto si concentra su quanto i fattori esterni possano influenzare i parametri ottenuti e quindi andare ad intaccare una corretta identificazione della condizione di danno.

Assioma V. Le scale di tempo e lunghezza associate alla definizione del danno indicano le proprietà richieste del sistema di sensori SHM.

Una valutazione a priori del tempo di intervento del danno e della scala di grandezza in cui questo è intervenuto permette di progettare al meglio la rete e il tipo di sensori più adatti.

Assioma VI. Esiste un compromesso tra la sensibilità al danno di un algoritmo e la sua capacità di rigettare il rumore.

Tramite il trattamento dei segnali o dei parametri da questi ottenuti è necessario definire i filtri analogici o digitali che riescono a trovare il giusto compromesso per ridurre la quantità di rumore nei dati.

Assioma VII. La dimensione del danno che può essere identificato dai cambiamenti dei sistemi dinamici è inversamente proporzionale al range delle frequenze.

Questo assioma ci suggerisce che solo con range di frequenza molto elevati è possibile identificare danni di piccole dimensioni.

Assioma VIII. Il danno aumenta la complessità della struttura.

Questo risulta ben visibile dall'analisi della risposta dinamica della struttura in condizione di pre-danneggiamento e post-danneggiamento.

Questi assiomi possono aiutare i neofiti dello Structural Health Monitoring che cercano un primo approccio in questo ambito, dalla ricerca alla pratica ingegneristica.

Il crescente interesse in questo settore è sostenuto da aziende pubbliche e private che non possono che trarre vantaggio economico dall'investigazione del danneggiamento dei loro prodotti; le aziende in campo aerospaziale la utilizzano per i loro space shuttle; nel campo meccanico è utilizzata per prevenire il collasso dei macchinari.

Ma è nel campo delle infrastrutture civile che il campo del SHM trova più largo spazio, fondamentale per definire lo stato di salute strutturale dell'edificio sia prima che dopo eventi sismici.

2.2 SHM e il patrimonio architettonico

Il patrimonio architettonico storico rappresenta una risorsa fondamentale per l'Italia e per l'Europa, ma riuscire a mantenerlo in buono stato richiede un ampio investimento di denaro; ancora più gravosi sono gli interventi necessari nel momento in cui insorge un danneggiamento tale da mettere a rischio la salute strutturale di quegli edifici che portano con sé una vasta eredità storica ed architettonica.

Il monitoraggio strutturale del patrimonio ha permesso, soprattutto negli ultimi 30 anni, di avere una conoscenza in real time, o quasi, del comportamento degli edifici monitorati. Questo ha favorito la programmazione degli interventi di manutenzione solo nei casi necessari, abbandonando le pratiche di manutenzione periodica degli edifici a favore di una manutenzione guidata dalla conoscenza dello stato dei fatti e della salute strutturale delle opere del patrimonio.

Le tecniche di SHM e nel dettaglio le tecniche di monitoraggio dinamico della struttura sono particolarmente indicate per il patrimonio architettonico, in quanto tecniche di indagine assolutamente non distruttive [4]. Il monitoraggio dinamico del patrimonio si affianca perfettamente ai principi che regolano lo studio e le indagini sul patrimonio stabiliti da ISCARSAH, International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, una rete di ingegneri coinvolti nella manutenzione e nella cura della nostra eredità architettonica e strutturale, creata da ICOMOS, il Consiglio Internazionale dei Monumenti e dei Siti, un'organizzazione internazionale non-governativa senza fini di lucro impegnata a promuovere la conservazione, la protezione, l'uso e la valorizzazione del patrimonio culturale mondiale. Le linee guida definite da ICOMOS definiscono il processo di riabilitazione strutturale del patrimonio con un approccio simile al trattamento delle malattie umane, composto da anamnesi, diagnosi, terapia e controlli finali. Fattore chiave della conservazione dei beni è il livello di conoscenza delle strutture il quale richiede indagini approfondite riguardanti aspetti strutturali, geometrici, ambientali, la conoscenza dei materiali e la loro storia.

La ricerca sviluppatasi recentemente nel campo del monitoraggio di strutture del patrimonio architettonico, quale il Santuario di Vicoforte oggetto del presente lavoro, si è concentrata sul ruolo dei test dinamici vibrazionali, e quindi sulle risposte dinamiche delle strutture sia ad azioni esterne di tipo sismico, vista la storia recente soprattutto nel nostro Paese, sia a vibrazioni di tipo ambientale, come nel caso di Vicoforte, il cosiddetto rumore bianco [4].

Gli approcci definiti come vibration-based SHM possono essere raggruppati in due categorie: data-driven, utilizzato in genere nel caso di monitoraggio permanente in cui si ha facilmente a disposizione un modello statico dei dati, e model-driven, in cui l'affidabilità del modello numerico agli elementi finiti rende quest'ultimo un punto di riferimento

La buona riuscita del monitoraggio di una struttura richiede attenzione in ogni sua fase [5], dal posizionamento dei sensori fino all'analisi dei parametri che vengono elaborati e che possono dare informazioni tali da poter realizzare un modello che possa riprodurre al meglio il comportamento strutturale dell'edificio. Fondamentale è la pianificazione della procedura di acquisizione dei segnali, ottimizzazione della rete e posizionamento dei sensori in modo tale da rendere questi ultimi sufficientemente sensibili all'eventuale danno grazie ai dati acquisiti.

La fase successiva è quella di più complicata realizzazione e costituisce uno dei pochi contro che l'utilizzo del monitoraggio dinamico comporta; a questo punto risultano infatti necessarie tecniche di processamento dei dati raccolti e l'utilizzo di complessi algoritmi di identificazione dinamica, di cui parleremo nel capitolo 4, i quali permettono l'elaborazione di parametri dinamici, quali frequenze, smorzamento e modi di vibrare. I risultati dell'identificazione dinamica in molti casi sono utilizzati per l'updating del modello agli elementi finiti che permette di avere una simulazione digitale del comportamento della struttura e infine la formulazione di possibili soluzioni di intervento al fine di migliorare, ove necessario, la salute strutturale del bene in questione.

Il monitoraggio dei beni del patrimonio architettonico risulta quindi fondamentale per la salvaguardia del patrimonio stesso in quanto :

- è una tecnica non distruttiva e permette di valutare direttamente gli effetti di un sisma valutando le condizioni del bene prima e dopo essere colpito da uno sciame sismico;
- il monitoraggio permanente, come nel caso del Santuario di Vicoforte, rende immediatamente riconoscibile qualsiasi tipo di evento sismico e cambiamento della struttura;
- permette di programmare degli interventi di conservazione del patrimonio solo quando realmente necessari.

2.3 Fasi del monitoraggio strutturale

Il problema del monitoraggio strutturale (SHM), può essere affrontato facendo riferimento al cosiddetto “*Statistical Pattern Recognition Paradigm Approach*” [3].

Questo approccio si fonda su quattro fasi differenti: valutazione operativa; acquisizione, fusione e pulitura dati; estrazione e condensazione delle informazioni; sviluppo di un modello statistico.

La valutazione operativa consente di dare una risposta a quattro quesiti riguardanti l’implementazione di un sistema di monitoraggio strutturale:

- Quali sono i motivi economici e/o di salvaguardia della vita umana che spingono lo sviluppo del monitoraggio?
- Come viene definito il danno per il sistema monitorato?
- Quali sono le condizioni, sia operative che ambientali, secondo le quali il sistema può funzionare?
- Quali sono le limitazioni nell’acquisizione dei dati nell’ambiente operativo?

Quando un sistema SHM viene implementato su una struttura, è importante che si definisca e si quantifichi il danno che si sta cercando, facendo in modo che la probabilità con cui esso sarà rilevato sia sufficiente. Il danno può essere identificato utilizzando due indici diversi:

- indice di danno locale $d_n = \frac{S_n - \bar{S}_n}{S_n}$

dove S_n è l’area trasversale non danneggiata, \bar{S}_n è l’area danneggiata;

- indice di danno globale $D = \frac{U - \bar{U}}{U}$

dove \bar{U} ed U rappresentano l’energia totale della struttura con riferimento al suo stato danneggiato e non.

Per valutare l’affidabilità di un sistema di monitoraggio è necessario prendere in considerazione gli effetti della variabilità ambientale sulla misura della risposta dinamica delle strutture, e gli inevitabili vincoli operativi, come vedremo più avanti.

L’acquisizione dei dati e la loro elaborazione rappresentano un’importante ruolo in quello che è il mondo del monitoraggio strutturale. Essa comporta infatti la scelta di numerosi fattori quali la quantità di dati da acquisire, il numero, la tipologia, la risoluzione e la collocazione dei sensori da impiegare, la larghezza di banda da considerare e la struttura di acquisizione, immagazzinamento e trasmissione dati.

Il fattore economico è un tassello che non può essere dimenticato nella costituzione di un sistema, in quanto incide fortemente sulla scelta di una tipologia di monitoraggio piuttosto di un’altra.

Da tenere anche in considerazione è sicuramente il fattore tempo; la raccolta dei dati deve essere strettamente collegata alla finalità del sistema, posto a visionare la manutenibilità della struttura (ante-evento) oppure a verificare la sua stabilità dopo un evento eccezionale (post-evento).

Poiché i dati sono misurati in differenti situazioni e possono subire variazioni in funzione dell'ambiente esterno e delle condizioni operative, la normalizzazione di questi diventa importante per la costituzione di un buon processo SHM, soprattutto per poter distinguere se questa variabilità è riconducibile ad un danno strutturale o ai sopracitati fattori. Risulta dunque necessario effettuare le appropriate acquisizioni in modo da poterle trattare statisticamente, traendone le opportune considerazioni.

Il concetto di fusione deriva dal campo militare in cui era necessario poter unire i numerosi dati a disposizione che provenivano da differenti fonti. A livello strutturale, il proposito della fusione è quello di integrare le acquisizioni provenienti da numerosi sensori in modo da creare uno strumento di analisi robusto.

In ultimo si rende necessario un processo di selezione dei dati che consenta di accettare quelli statisticamente validi e rigettare i restanti.

L'estrazione delle informazioni necessarie ad una corretta valutazione del danno è una delle parti che riceve maggior attenzione dalla letteratura. Questo processo consente, attraverso la misura della risposta vibrazionale, di poter distinguere tra una struttura danneggiata ed una che non lo è. In genere, tutte le caratteristiche estratte che possono essere ritenute utili vengono assemblate in database.

Numerosi metodi possono essere impiegati per l'identificazione dei parametri e delle caratteristiche necessarie ad una corretta valutazione del danno. Un aiuto concreto può sicuramente arrivare da informazioni registrate per eventi passati, anche se non riguardanti direttamente il caso preso in esame. Una simulazione numerica della risposta del sistema in termini di danno può essere un ulteriore e valido aiuto per l'identificazione delle caratteristiche necessarie.

Quando si parla di condensazione invece, si fa riferimento a ciò che si è riportato sul concetto di fusione, ovvero all'importanza di ottenere uno strumento robusto di raccolta dati, decisamente importante quando la campagna di acquisizione si estende ad un lungo periodo in cui differenti fattori possono influenzare le misure.

Al contrario di ciò che è accaduto per lo studio delle fasi di estrazione e condensazione, lo sviluppo di modelli statistici per l'analisi dei dati raccolti non ha ricevuto degna attenzione dalla

letteratura. Nonostante questa carenza, in letteratura si trovano in genere tre categorie di algoritmi per lo sviluppo di un modello statistico: group classification; regression analysis e outlier analysis.

I primi due sono algoritmi che possono essere ricondotti alla famiglia dei cosiddetti “*supervised learning*”, ovvero di quelli che possono essere impiegati quando sono disponibili dati sia per la struttura non danneggiata che per quella danneggiata. L’ultimo invece fa parte della categoria dei cosiddetti “*unsupervised learning*”, cioè di quegli algoritmi utilizzabili quando non sono a disposizione dati riferiti allo stato danneggiato dell’opera.

Per identificare il tipo di danno devono essere disponibili dati relativi a strutture che presentano specifici tipi di danneggiamento, in modo da poterli correlare con quelli rilevati. In questo caso risulta necessaria l’applicazione del metodo “*supervised learning*”.

Sono invece indispensabili modelli analitici per stimare la gravità del danno ed il margine di vita utile della struttura, a meno che non si disponga di dati relativi al sistema stesso, o ad altri simili, in presenza di differenti livelli di danno. L’entità del danno e la vita residua possono essere valutati con il metodo “*supervised learning*”, ma esclusivamente dopo aver individuato il tipo di danno presente.

Fase molto importante del processo di sviluppo del modello statistico è quella di test dei modelli; essi vengono eseguiti con dati reali per definire la sensibilità al danno delle caratteristiche selezionate e verificare la possibilità di falsa indicazione di danno.

Uno dei problemi del monitoraggio, che ancora non ha avuto soluzione, è legato a quelli che sono stati oggetto principale di studio nel presente lavoro di tesi, vale a dire tutti i fattori, siano essi ambientali, operativi o di altra natura, che possono avere delle influenze sui parametri dinamici, i quali sono influenzati da massa e rigidità della struttura, che nella procedura di identificazione risultano a noi ignoti.

2.4 Condizioni operative ed ambientali e l'identificazione del danno

Al fine di favorire la buona riuscita delle procedure di Structural Health Monitoring risulta fondamentale individuare i parametri, siano essi statici e dinamici, la cui analisi permette di investigare il reale stato di salute della struttura, e che quindi rappresentano i suoi punti di vulnerabilità. Ma ancora più importante è individuare quei fattori che influenzano i parametri analizzati, causandone delle false identificazioni di danno.

Come stabilito da uno degli assiomi del SHM [3], l'identificazione del danno necessita del confronto tra due situazioni, che possono essere legate al monitoraggio della struttura in due momenti differenti, identificati come pre e post danneggiamento, oppure due situazioni originate da tipi di analisi differenti. Risulta frequente avere delle differenze tra, parlando nello specifico di analisi dinamiche, le frequenze ottenute da processi di identificazioni dinamiche, e quelle ottenute dall'analisi dinamica del modello agli elementi finiti, realizzato tramite specifici software agli elementi finiti, che dovrebbe rappresentare la risposta reale della struttura in questione. Quello che ci preoccupa sottolineare è che in molti casi le fluttuazioni dei parametri individuate non sono legate al danneggiamento della struttura.

Come già precedentemente stabilito, il riconoscimento del modello statistico per un sistema SHM deve seguire quattro fasi : valutazione operativa, acquisizione dati, selezione delle caratteristiche e modellazione statistica per discriminazione delle caratteristiche. Mentre il concetto di machine learning, di cui parleremo più avanti, interviene delle ultime due fasi, è necessario partire da una definizione chiara di quelle che sono le condizioni operative ed ambientali della struttura.



Figura 3 Le condizioni operative e ambientali associate ad una piattaforma offshore fanno sorgere molti dubbi sulla realizzazione di un sistema di SHM

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di avere una visione più chiara di quelli che sono i fattori che possono complicare l'identificazione del danno, e, tramite le procedure di machine learning eliminare la loro influenza sui parametri dinamici elaborati, e distinguere quindi le variazioni di frequenza dovute al danno da quelle dovute ad altri fattori.

Un esempio lampante di come gli agenti esterni possano influenzare la risposta della struttura sono le piattaforme offshore, in cui la definizione delle condizioni ambientali ed operative in cui si trova la struttura durante il monitoraggio è uno strumento indispensabile per la corretta applicazione del sistema SHM.

Il Santuario di Vicoforte, una struttura in muratura del diciassettesimo secolo, è un caso di studio ideale per la valutazione delle relazioni esistenti tra fattori operativi ed ambientali e le fluttuazioni dell'andamento delle frequenze. L'edificio, famoso per la cupola ovale in muratura più grande al mondo, ha sofferto negli ultimi secoli di significativi problemi strutturali, in parte dovuti al cedimento delle fondazioni. Decenni di studi sulla struttura hanno permesso di avere a disposizione un modello agli elementi finiti accurato e predittivo della risposta della struttura, ma i fattori che hanno maggiore influenza su quest'ultima non sono mai stati studiati in maniera approfondita.

I risultati ottenuti dagli studi realizzati negli ultimi anni hanno spesso fatto pensare che le frequenze, ottenute da un processo ormai automatizzato di identificazione dinamica, come vedremo nel capitolo 4, siano fortemente influenzate da condizioni ambientali ed operative, quali temperatura, umidità, vento, precipitazioni, condizioni del terreno, eccitazioni ambientali ecc., oltre dalla presenza di danni strutturali.

In studi precedenti la teoria della cointegrazione è stata utilizzata per poter distinguere i cambiamenti delle proprietà dinamiche causate da variazioni di temperatura da quelle legate all'evoluzione del danno. Nel presente lavoro prendiamo in considerazione tutti i fattori esterni, elaborando ed analizzando statisticamente i dati provenienti dai sistemi di monitoraggio, studiandone le correlazioni, proponendone dei modelli di regressione e cercando di migliorare il metodo di identificazione del danno già utilizzando per il Santuario di Vicoforte.

3. La Basilica Regina Montis Regalis di Vicoforte (CN)

3.1 La storia del Santuario

Il Santuario di Vicoforte, nei pressi di Mondovì (CN), è una struttura dalla grande rilevanza storica e architettonica, e deve la sua fama principalmente alla cupola ellittica in muratura, che, con i suoi 37.15 m lungo l'asse maggiore e 24.80 m lungo l'asse minore, è la quinta al mondo per dimensioni (dopo Santa Maria del Fiore a Firenze, il Pantheon e San Pietro a Roma e Gol Gumbaz in India), ma detiene il primato tra le cupole ellittiche.

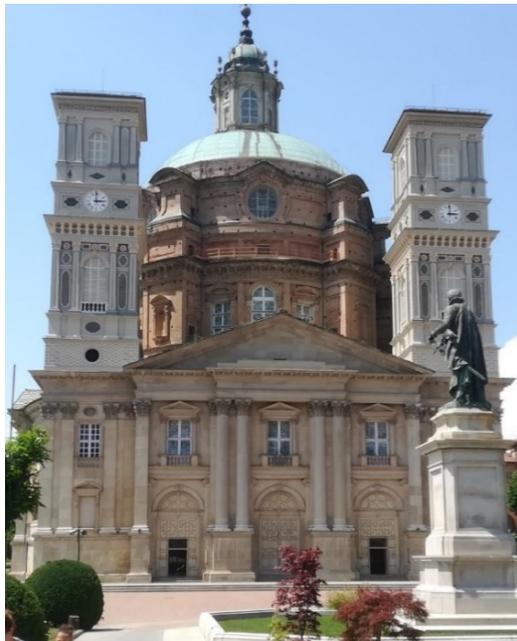


Figura 4 Facciata anteriore della Basilica di Vicoforte

La storia del Santuario è facilmente consultabile sul suo sito web <https://www.santuariodivicoforte.it>. Inizialmente voluto dal Duca Carlo Emanuele I di Savoia come mausoleo per la sua dinastia, i lavori per la costruzione del Santuario iniziarono nel 1596 guidati dall'architetto Ascanio Vitozzi, e dal principio furono evidenti importanti cedimenti differenziali delle fondazioni, dovuti alla sfortunata scelta del sito di costruzione del santuario. L'architetto Vitozzi si basò su un originario progetto proposto da Ercole Negri, apportandovi delle modifiche. Il tempio fu costruito nel punto in cui si trovava il pilone con l'effigie con la Madonna con il bambino, da cui aveva avuto origine la devozione per la Nostra Signora Montis Regalis alla quale è dedicato il Santuario.

Il Santuario di Vicoforte però, ubicato alle pendici del colle su cui sorge l'omonima cittadina, venne eretto su un terreno altamente disomogeneo, costituito da un solido letto di marna che ad est lascia il posto ad uno strato di argilla, il quale iniziò a cedere al confluire delle acque piovane man mano che il peso della struttura in costruzione incrementava. Cinque degli otto pilastri che costituiscono la fondazione sono immersi in uno strato di limo argilloso, i restanti tre sono invece sorretti dallo strato di marna.

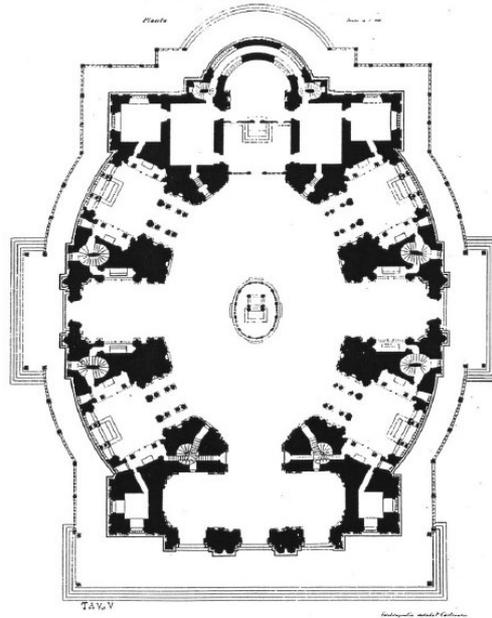


Figura 5 Progetto modificato da Ascanio Vitozzi

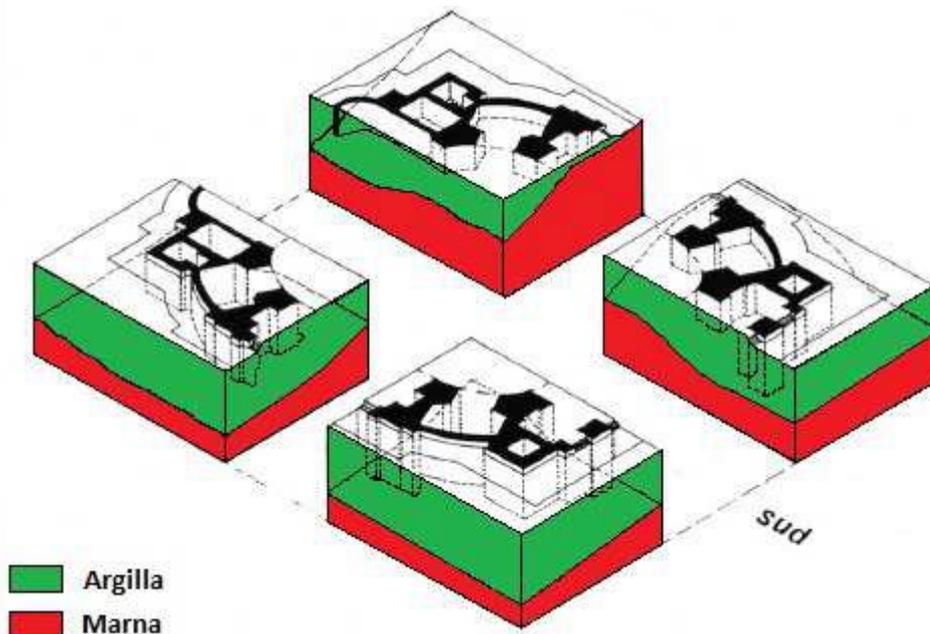


Figura 6 Rappresentazione assonometrica del terreno al di sotto delle fondazioni

Il problema costrinse l'architetto a sospendere la costruzione del monumento, che nel mentre aveva raggiunto circa i 10 m di altezza, per dedicarsi alla realizzazione di opere di drenaggio delle

acque. Con la morte dell'architetto Vitozzi (1615) i lavori proseguirono a rilento sotto la direzione di vari capimastri per tutto il 1600.

È il barocco di Francesco Gallo che completa l'ardito progetto rimasto incompiuto per oltre mezzo secolo, il quale prese in mano il cantiere a partire dal 1701, quando l'edificio aveva raggiunto l'altezza di 19 m.

Il punto di contatto tra i due stili, rinascimentale e barocco, e allo stesso tempo punto di raccordo tra le due scuole (quella del Vitozzi e quella del Gallo) che contraddistinguono i due principali momenti della costruzione, sta nei grandi finestroni serliani del possente tamburo. I vigorosi e vibranti contrafforti esterni, superando la solenne compostezza cinquecentesca della base, consentono alla grande cupola di elevarsi e di espandersi creando un effetto spaziale di barocca imponenza: cupola ampia ma fragile, solenne ma leggera.

Una luce copiosa scende dall'alto ad avvolgere l'elegante tempietto che incornicia il sacro pilone, offrendogli il giusto risalto. In Basilica la diversa distribuzione della luce è prevista già nel progetto originale: quasi assente nelle cappelle funerarie, per conciliare il sonno eterno, ma ampiamente diffusa nei due bracci della croce. La luce barocca rivela e nasconde, scende ed eleva lo spirito e l'orazione del fedele, si confonde con le ombre profonde degli angoli più nascosti, inganna con i finti raggi di sole.

Il tempietto al centro della navata è anch'esso una straordinaria invenzione barocca: concilia felicemente l'esigenza di dare risalto plastico all'umile edicola sacra e di rapportarla alle proporzioni dell'immensa costruzione del Santuario.

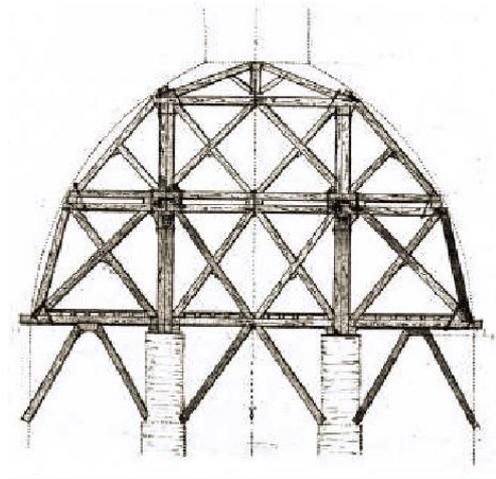


Figura 7 Ricostruzione grafica del Ponte Reale

Nel 1722 iniziarono i lavori per la costruzione del *Ponte Reale*, l'armatura in legno che sostenne la cupola durante le fasi di posa in opera, poggiante su pilastri in muratura provvisori della dimensione di due metri per due. La cupola venne costruita in pochi mesi e disarmata nella

primavera del 1732. Il progetto della cupola beneficiò quasi certamente della collaborazione di Filippo Juvarra in quanto in archivio sono conservati disegni raffiguranti più versioni della cupola (con estradosso a gradoni) una delle quali attribuita all' architetto messinese.

I contrafforti vennero costruiti contemporaneamente alla volta; quelli posizionati lungo l'asse maggiore della cupola vennero realizzati cavi, sia per ricavare in alcuni di essi le scale, sia per evitare un dispendio di materiale eccessivo nelle zone in cui si prevedevano spinte orizzontali minori. Vennero realizzate delle nervature sull'estradosso della cupola per irrigidire la stessa e scaricare gli sforzi sui contrafforti, ed inoltre posta in opera la cerchiatura della cupola con 3 anelli metallici sul filo esterno. Due anelli, composti da due barre in ferro forgiato, di sezione 40x70 mm, poste di piatto e affiancate, vennero posizionati immediatamente sopra e sotto le finestre ovali e il terzo, di sezione 50x50 mm, posizionato al livello dell'imposta interna della cupola. Questi anelli sono composti da tratti rettilinei di lunghezza variabile di circa 3m, giuntati con bolzoni fissati attraverso un perno in ferro e messi in tensione da due cunei anch'essi in ferro [6].

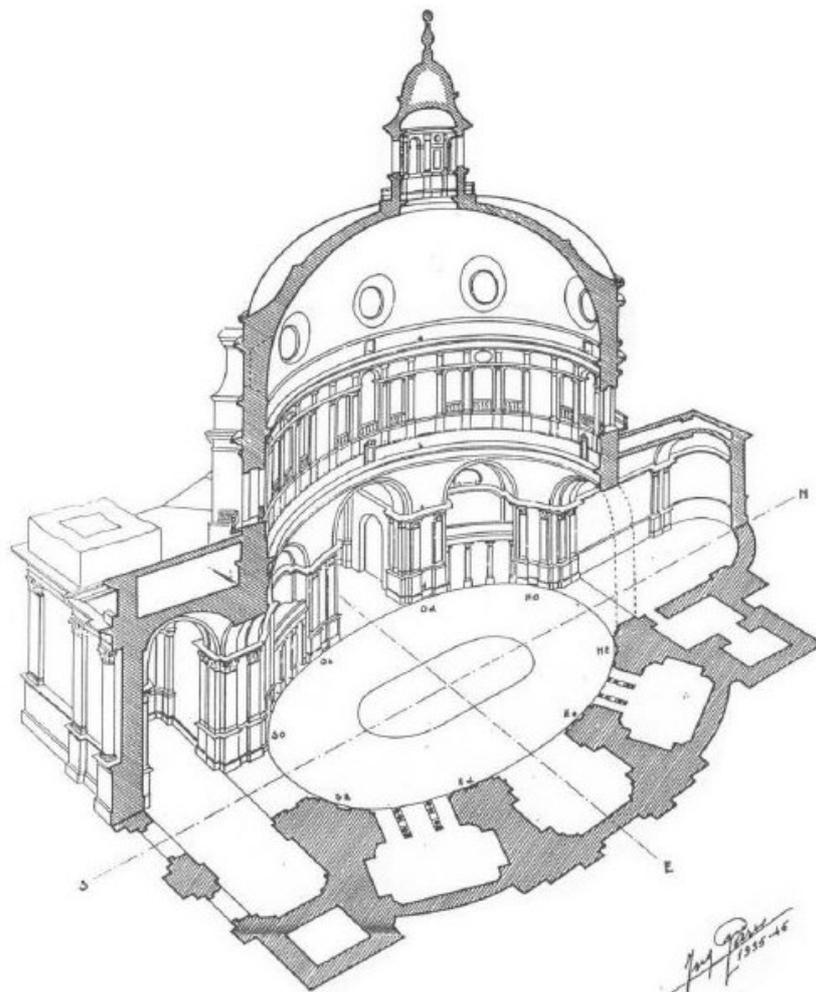


Figura 8 Taglio assonometrico della basilica

Nel 1735 fu costruito il lanternino, mentre l'opera fu conclusa nel 1750 sebbene i lavori di completamento del santuario siano durati fino al 1917, anno in cui fu bandito il concorso per la progettazione dei nuovi campanili.

La cupola di Vicoforte è un esempio di come i tipici sistemi cupola-tamburo, molto spesso presenti nello scenario italiano, siano molto più soggetti a problemi sia di natura statica sia di natura dinamica rispetto al solo sistema cupola. Il sistema cupola-tamburo ha infatti sofferto sin dal principio di significativi problemi strutturali, in parte dovuti ai cedimenti differenziali, in parte dovuti alla configurazione strutturale del sistema stesso, le cui dimensioni erano molto elevate per gli standard dei quel tempo.



Figura 9 Sistema cupola tamburo del Santuario di Vicoforte

3.2 Quadro fessurativo, indagini ed interventi

L'arditezza della concezione strutturale del Gallo, combinandosi sfavorevolmente con i nuovi assestamenti dell'edificio dovuti alle ulteriori masse costruite, costituisce la causa principale della serie di dissesti strutturali che hanno caratterizzato la vita del monumento nei due secoli successivi, con la comparsa di grandi lesioni meridiane nel sistema cupola-tamburo tali da creare giustificate preoccupazioni sulla stabilità del sistema stesso e dell'edificio nel suo complesso [7]. Tra i principali danni strutturali si annoverano:

- grandi cedimenti delle fondazioni durante la costruzione delle parti massicce inferiori (inizio 1600) e dopo la costruzione della cupola (1731);
- progressiva apertura di grandi fessure lungo i meridiani: fessura singola, massima ampiezza 82 mm; ampiezza totale lungo il perimetro, 413 mm.

Considerata l'insufficienza dei cerchiaggi originali in ferro posti in opera dal Gallo per il contenimento delle azioni spingenti della cupola, un moderno sistema aggiuntivo di cerchiaggio attivo in acciaio ad alta resistenza venne inserito nel 1986 all'interno della muratura del tamburo.

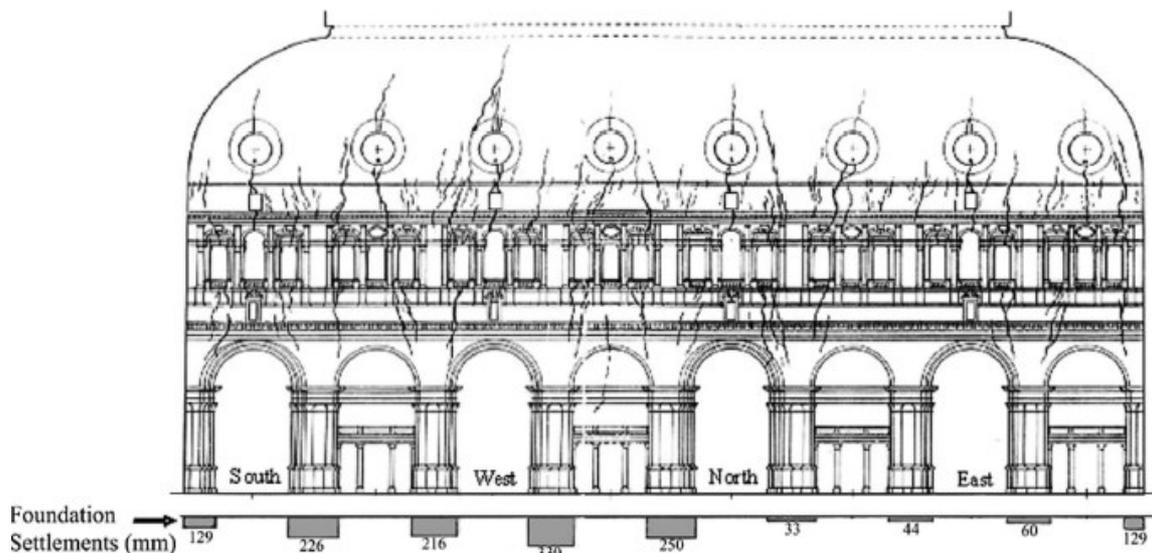


Figura 10 Fessure e cedimenti lungo il perimetro del Santuario

Particolarmente critiche sono le condizioni del sistema cupola-tamburo su cui sono concentrate le lesioni. Nel 1934 il vescovo, preoccupato per i problemi cronici del santuario, incaricò l'ing. Garro di eseguire un'analisi ed uno studio approfondito sullo stato fessurativo del Santuario, in modo da proporre eventuali lavori di consolidamento e restauro. Furono necessari circa trent'anni di lavoro (1934 – 1963) per definire questo primo approccio alla conservazione dell'edificio ed una preziosa indagine riguardante la definizione della geometria dell'edificio, le fasi costruttive, i sondaggi, il monitoraggio delle lesioni. Questo si è rivelato tuttora di grande interesse e utilità, nonostante alcune inevitabili imprecisioni imputabili all'inadeguatezza dei mezzi tecnici a disposizione.

Secondo l'ing. Garro il cornicione ellittico subì un cedimento iniziale di circa 2 cm ed uno successivo di circa 4 cm dopo la costruzione del grande tamburo; in seguito al disarmo della cupola si verificarono inoltre cedimenti sul lato ovest dell'ordine del centimetro, con l'apertura di piccole lesioni nel tamburo e alla base della calotta, che potrebbero tuttavia rappresentare gli effetti dell'assestamento della grande volta.

Prendendo come punto di riferimento il pilone fondato direttamente sulla marna, che non ha subito cedimenti, Garro rilevò in vari punti e a varie altezze le deformazioni verticali. Conoscendo inoltre i periodi in cui le diverse componenti furono costruite, fu in grado di tracciare una mappa dei cedimenti attraverso le differenti epoche, notando come i cedimenti maggiori fossero quelli del pilastro sul lato nord della sezione di ponente. In corrispondenza di questo pilastro, al momento dell'elevazione della cupola, il cedimento massimo riscontrato fu di 550-600 mm.

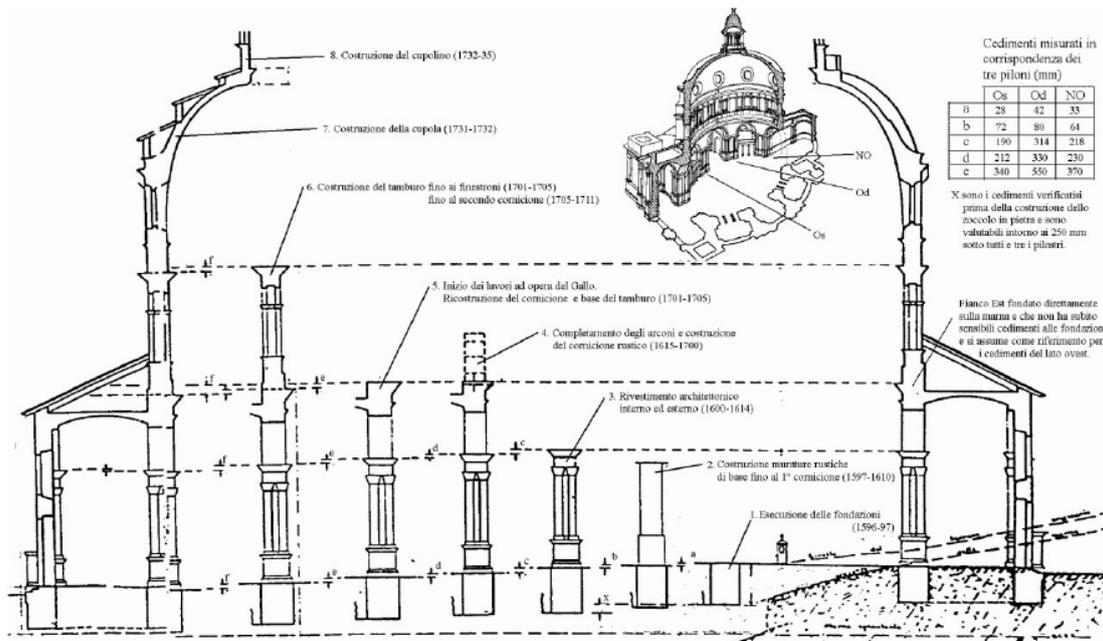


Figura 11 Evoluzione dei cedimenti delle fondazioni nel tempo (Garro 1962)

Di particolare rilevanza sono i cedimenti tra pilastri adiacenti in quanto dovuti agli ingenti sforzi taglienti negli archi di cui formano l'imposta. Questi sono ben visibili tra i pilastri nord-ovest e nord-est in cui la differenza di cedimento è pari a 204 mm. Osservando l'evoluzione dei cedimenti si nota come gli intervalli temporali 1596-1610 e 1614-1701 siano stati quelli più significativi. Il sistema di drenaggio ha limitato l'entità dei cedimenti nel periodo compreso tra i due lassi temporali. Il sistema di drenaggio dalla morte del Vitozzi smise di funzionare a causa della mancanza di manutenzione; fu poi ripristinato dal Gallo, riuscendo a limitare i cedimenti tra il 1701 e il 1750.

Stabilire l'entità dei cedimenti sviluppatasi dopo la fine della costruzione rimane più difficile in quanto non sono facilmente rintracciabili. Nel 1830 l'ing. Virginio Bordino fu incaricato di realizzare un condotto di drenaggio che corre lungo tutto il perimetro del santuario, che riuscì a migliorare le condizioni delle fondazioni. Un passo falso fu quello di far convogliare nel condotto di drenaggio lo scarico delle acque piovane del santuario tra il 1883 e il 1908, andando ad intaccare il buon funzionamento delle fondazioni. Nel 1946 il Garro fece sistemare i condotti ampliandone la rete, arrestando lo sviluppo dei cedimenti fondali.

Per concludere si può affermare che lo stato fessurativo del sistema cupola-tamburo è sostanzialmente dovuto a tre principali cause:

- cedimenti fondali;
- variazioni stagionali di temperatura;
- spinte orizzontali causate dal peso proprio della cupola.

Osservando i rilievi del Garro si notano come le fessurazioni siano asimmetriche, a causa dei cedimenti differenziali dei pilastri. La causa determinante delle fessurazioni è da imputare alle tensioni orizzontali sviluppatesi a causa del peso della cupola, e catalizzate dalle otto aperture ovali.; infatti in prossimità degli ovali le fessure aumentano in termini di lunghezza, spessore e profondità.

La lesione di dimensioni maggiori è ben visibile sul lato ovest e si estende per 13.10 m all'estradosso e 21.20 m all'intradosso con un'ampiezza massima pari a 48 mm.

Per quanto riguarda il consolidamento della struttura, Garro indicò nella sua relazione del 1962 una serie di opere che potessero in qualche modo preservare il Santuario negli anni. Gli interventi proposti si possono sostanzialmente riassumere in: ripristino dei cunicoli, da affiancare ad una costante manutenzione, e realizzazione di una fascia continua di cerchiaggio del tamburo ed eventualmente della cupola a livello delle reni.



Figura 12 Visuale esterna della fessura ad ovest

3.2.1 Nuovo sistema di cerchiaggio

Nel principio degli anni '80 del secolo scorso furono condotte una serie di campagne investigative con il fine di ottenere dati certi sulle condizioni attuali delle fondazioni, sugli aspetti geotecnici del sito, la geometria della cupola e del santuario e le proprietà meccaniche della muratura. In seguito a queste indagini fu progettato un sistema di cerchiaggio che venne messo in opera tra il 1985 e il 1987. Tale sistema consiste in 56 tiranti post-tesi in acciaio ad alta resistenza di tipo Dywidag ($f_y \approx 1080$ MPa, 32 mm di diametro) inseriti all'interno della muratura in cima al tamburo ancorati in 14 punti lungo il perimetro del santuario [8]. L'interfaccia tra due serie adiacenti di barre è costituita da un intelaiatura in acciaio inserita nella muratura, necessaria per garantire la continuità. Le barre furono dotate di dispositivi di tensionamento azionabili mediante martinetti e di celle di carico per la lettura istantanea dei valori di carico, posti alle due estremità. Le barre furono ritensionate nel 1997.

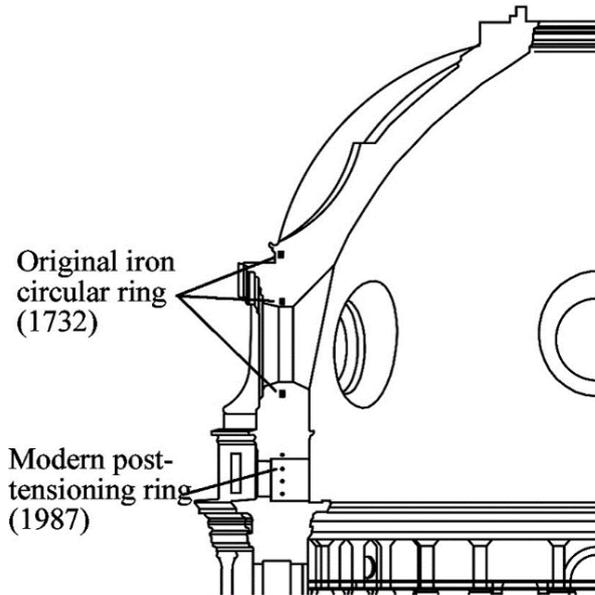


Figura 13 Posizionamento nuovo e vecchio sistema di cerchiaggio

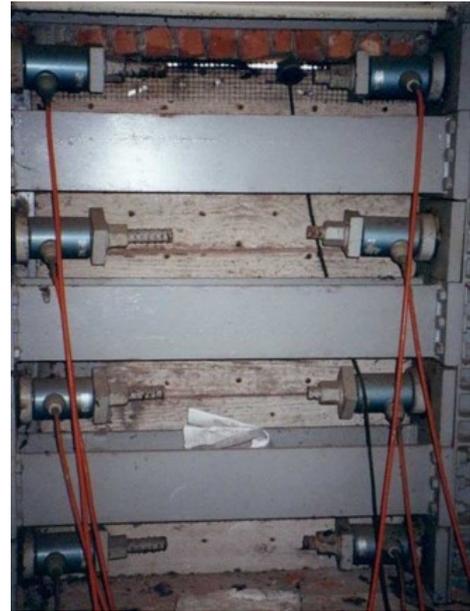


Figura 14 Collegamenti in acciaio dei segmenti dei cavi di cerchiaggio

3.2.2 Campagne di indagine

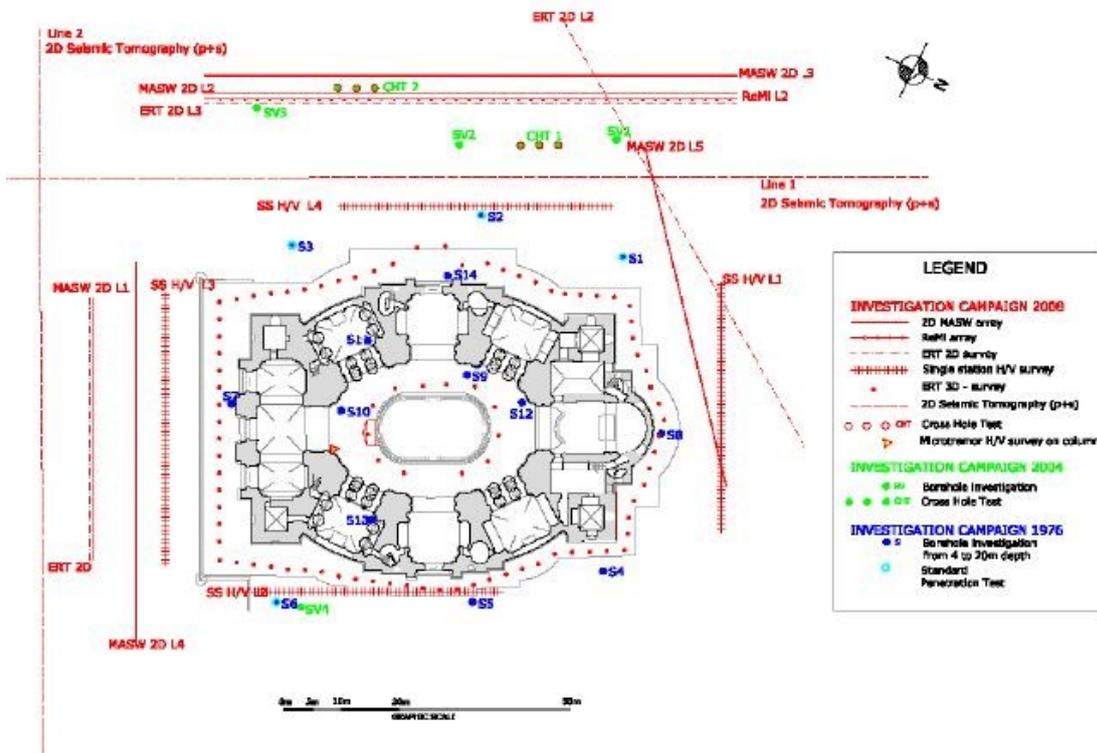


Figura 15 Visione delle campagne di indagine dal 1976 ad oggi

In passato ci si è dedicati ad investigazioni di vario tipo del Santuario. Tra le varie indagini troviamo una serie di rilievi effettuati nella prima metà del secolo scorso ed un rilievo fotogrammetrico dell'intradosso della cupola svolto nel 1976; più recentemente è stato seguito un nuovo rilievo dell'intero monumento dalla base alla cupola affiancato da un rilievo realizzato grazie ad un laser scanner dell'esterno del santuario al fine di ottenere una definizione precisa della geometria della struttura [7].

Sono state svolte anche delle termografie per individuare difetti quali delaminazione e infiltrazioni d'acqua.

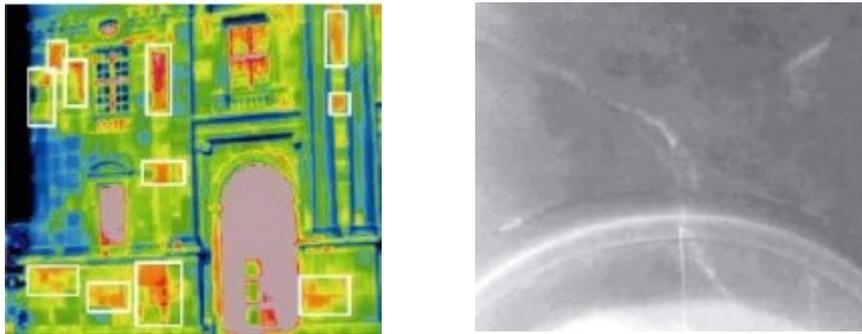


Figura 16 Immagini termografiche della facciata e della volta della cupola

Nel 1979 in seguito a test di compressione effettuati sulla muratura vennero ricavati i seguenti risultati:

- modulo di Young: 1500 MPa,
- resistenza a compressione : 3 MPa.

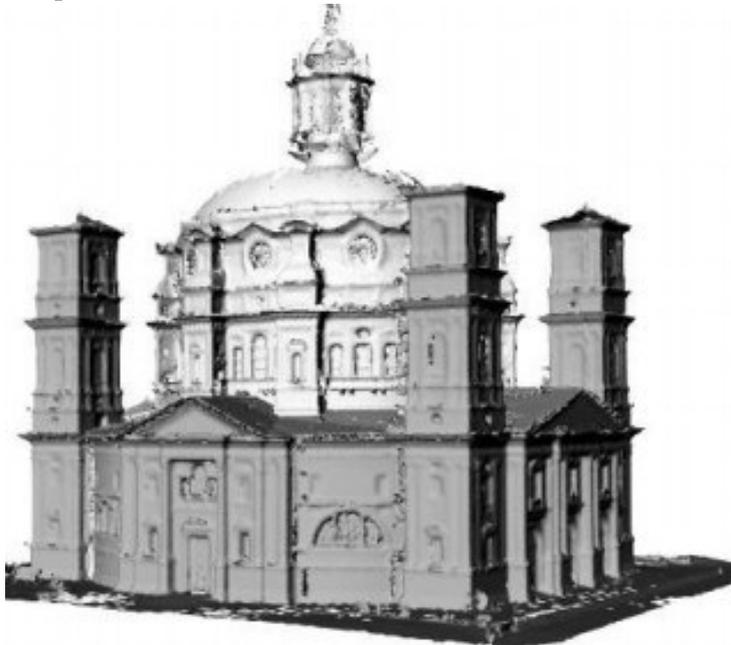


Figura 17 Visione al laser scanner del santuario

I test non distruttivi svolti nel 2004 per la valutazione della resistenza a compressione e del modulo di Young della muratura attraverso l'utilizzo di prove sclerometriche e del Windsor Pin System evidenziarono una buona corrispondenza dei risultati con quelli svolti nel 1979. In particolare fu riscontrata la relazione pressoché lineare tra la resistenza alla penetrazione e la resistenza a compressione, e tra quest'ultima e il modulo di Young della muratura.

Come descritto nella relazione geotecnica, nel 1975 venne realizzata una prima campagna di indagini geotecniche che prevedeva una serie di sondaggi che confermarono l'eterogeneità del piano raggiunto dalle fondazioni, i cui cedimenti differenziali furono ancora una volta indicati come principali responsabili dei dissesti della struttura. Prove contestuali hanno permesso di stabilire come l'argilla interessata dalle fondazioni avesse raggiunto il suo limite di consolidamento e che, dunque, sono da escludersi nuovi assestamenti in assenza di eventi esterni che modifichino lo stato attuale dei carichi.

Le prove consistettero in 13 sondaggi seguiti da test in laboratorio su campioni di provini indisturbati. I sondaggi coprono una vasta area, dentro e fuori il Santuario, accompagnati da 29 fori alla base della struttura in muratura attraverso le fondazioni.

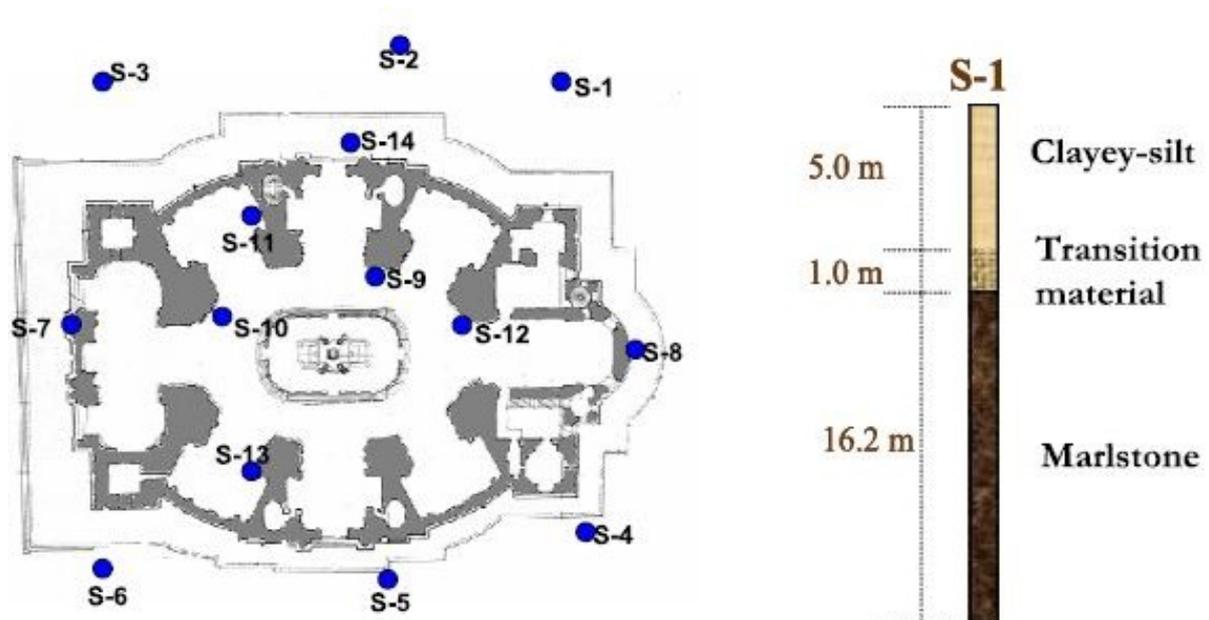


Figura 18 Caratterizzazione del terreno

Queste indagini rivelano uno strato di marna che si abbassa in direzione sud-ovest, passando da 3 a 9 m sotto il livello del mare; le strutture di fondazione a sud-ovest, soprattutto quelle dei pilastri che reggono il sistema cupola-tamburo si trovano su uno strato di argilla limosa che raggiunge lo spessore massimo di 3 m.

La campagna del 2004 coincide con l'installazione di 3 celle piezometriche facenti parte del nuovo sistema di monitoraggio, ed include 4 sondaggi geotecnici, ognuno dei quali produce 5-6 campioni di terreno indisturbati, 2 test sismici di cross-hole per la determinazione dei profili di velocità delle onde di taglio e di compressione.



Figura 19 Fotografie scattate in occasione delle indagini geotecniche

3.3 I sistemi di monitoraggio

Esistono numerose tipologie di monitoraggio strutturale; tuttavia non si deve considerare questa tecnica di indagine come un predittore in termini assoluti del comportamento di una struttura in ogni situazione.

Una prima distinzione la si può ottenere dalla metodologia impiegata.

Un primo approccio alla struttura può essere fornita dal monitoraggio visivo; questo può essere inteso come controllo periodico dell'insorgenza di stati fessurativi, fenomeni di degrado, trasformazioni nella struttura e nell'ambiente circostante.

Per un'indagine più approfondita si rende necessario l'utilizzo del monitoraggio strumentale che consente di tenere sotto controllo, periodico oppure permanente, parametri che altrimenti non sarebbero individuabili.

Nell'ambito del monitoraggio strutturale possiamo distinguere:

- monitoraggio statico;
- monitoraggio dinamico.

Entrambe le tipologie di monitoraggio strutturale sono state utilizzate per indagare il comportamento del Santuario di Vicoforte, come vedremo nel dettaglio in seguito.

3.3.1 Il sistema di monitoraggio statico

Il monitoraggio statico consiste nella rilevazioni di parametri quali statici che possono avere una certa rilevanza nella valutazione del comportamento strutturale. Tra i parametri presi in considerazione quando si vuol eseguire un monitoraggio completo della struttura troviamo pressione, forza, temperatura, umidità, livello della falda, ecc. Ogni grandezza è misurata e rilevata da appropriati sensori (piezometri, celle di carico, celle di pressione, sensori di temperatura e umidità, fessurimetri).

Eseguire un controllo continuo e duraturo è importante per riuscire a distinguere i fenomeni ciclici da quelli patologici, quali ad esempio quelli riguardanti l'incremento di lesioni e dissesti.

Il monitoraggio statico consente la conoscenza dei parametri a livello puntuale, che una volta elaborati possono aiutare a comprendere il comportamento a livello globale. Risulta necessario costituire un'affidabile architettura del sistema in modo che ogni strumentazione impiegata sia funzionale alle altre e non fine a se stessa, in modo da poter impiegare tutte le informazioni raccolte in maniera esaustiva ed efficiente.

Le strumentazioni non rappresentano il sistema di monitoraggio nel suo completo, ma devono essere accompagnati aspetti altrettanto importanti.

Primo fra tutti è la buona conoscenza del manufatto, vale a dire le sue caratteristiche geometriche, strutturali, fessurativo e tutte quelle necessarie ad una completa comprensione dell'opera.

Alle apparecchiature di misurazione si aggiungono poi gli apparecchi di trasduzione utilizzati per inviare alle unità di acquisizione i dati registrati dagli strumenti.

In ultimo è fondamentale un buon software di trattamento dei dati che non si fermi alla sola registrazione ed illustrazione dei valori, ma effettui un'analisi più approfondita utile ad ottenere informazioni preziose sul comportamento di una struttura.

Il sistema di monitoraggio statico recentemente utilizzato per monitorare, in modo permanente, il Santuario di Vicoforte è una versione aggiornata della strumentazione installata durante i lavori di rinforzo della cupola eseguiti tra il 1985 e il 1987. Il sistema è stato installato nel 2004 ed ha registrato ed immagazzinato dati fino al 2014, dati che hanno permesso di studiare l'evoluzione delle condizioni di danneggiamento con l'obiettivo di identificare i fenomeni che ne rappresentano la causa.

La strumentazione può essere suddivisa in due gruppi: strumenti finalizzati alla misurazione di spostamenti, deformazioni e stati tensionali all'interno della struttura e strumenti finalizzati alla misurazione delle condizioni al contorno e ambientali [8].

Il primo gruppo include: 12 fessurimetri (LVDTs) applicati all'imposta della cupola, in corrispondenza delle fessure principali; 20 celle di pressione idraulica per valutare la variazione dello stato tensionale all'interno dei contrafforti, negli otto pilastri principali e sulla cupola; 56 celle di carico posizionate nella parte terminale dei tiranti per controllare il loro stato tensionale e infine 2 estensimetri posizionati all'imposta della cupola per misurare variazioni nella convergenza degli assi principali della cupola.

Il secondo gruppo di strumenti include: 24 sensori di temperatura (17 posizionati all'interno della muratura e 8 esternamente), 1 igrometro 3 piezometri per il monitoraggio del livello di falda ed infine un sensore idrometrico all'interno della vasca di raccolta delle acque del sistema di drenaggio.

Tutti gli strumenti inoltre, sono collegati ad un'unità di acquisizione e raccolta dati automatizzata, la quale registra i dati ogni ora. Analizziamo ora tutti i tipi di sensori presenti [9].

I vecchi fessurimetri di tipo potenziometrico sono stati sostituiti con sensori di spostamento a LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Sono stati utilizzati fessurimetri MSC 710 (Miniature Sensor Controller 710 MICRO-EPSILON).

I fessurimetri sono tutti posizionati in corrispondenza della parte inferiore della cupola, proprio perché è in questa zona che si sono sviluppate le fessure principali.

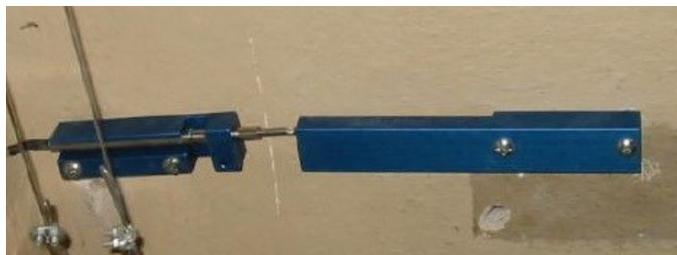


Figura 20 MSC710 Sensor Controller Series LVDT

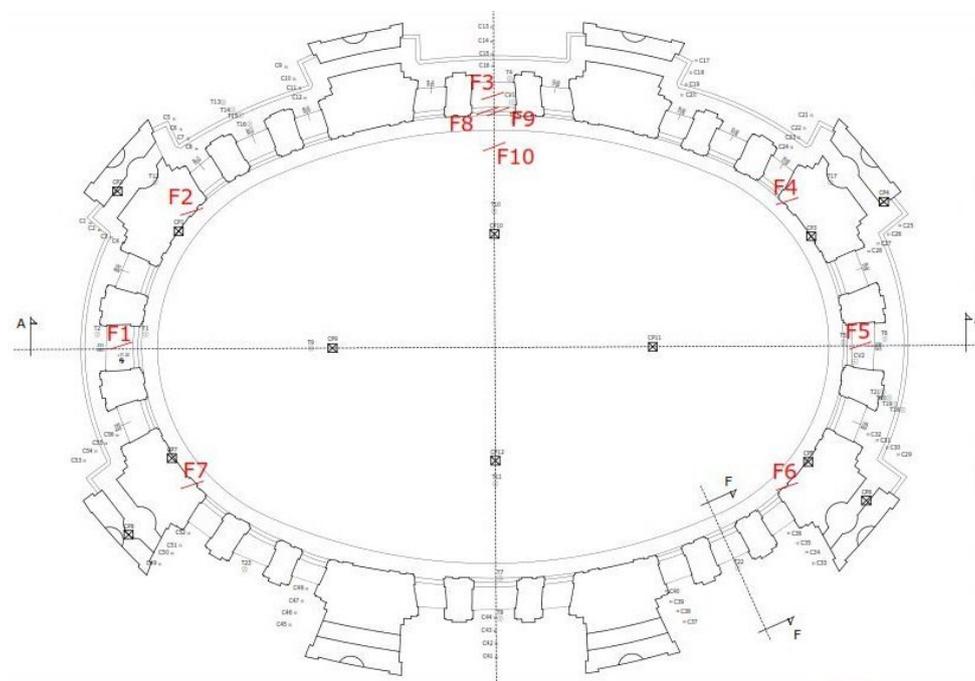


Figura 21 Configurazione planimetrica disposizione fessurimetri

I fessurimetri possono essere così raggruppati:

- fessurimetri posizionati a sud: F1, F2, F7;
- fessurimetri posizionati ad ovest: F3, F8, F9, F10, F11;
- fessurimetri posizionati a nord: F4, F5, F6.

Nel 1983 furono installate all'interno del Santuario 20 celle di pressione idrauliche. Il fattore altezza/diametro delle celle è compreso nell'intervallo $0,1 \div 0,5$ che, abbinato alle condizioni in cui operano, porta ad un errore di misura più che accettabile. Le celle possono operare sia pneumaticamente che idraulicamente. Il liquido utilizzato è una miscela di Kerosene (90%) e olio lubrificante (10%). Il

sistema di misura è basato su un metodo di compensazione idraulica. Lo strumento è idoneo per l'utilizzo all'interno di edifici di pubblico interesse, grazie al giusto connubio tra resistenza e piccolo spessore. L'installazione è molto semplice. Le celle di pressione utilizzate sono Minipiezometri PP 16 SS AU. Questi trasduttori di pressione sono stati sviluppati specialmente per misure di pressione idrodinamiche e aerodinamiche su una larga banda di frequenza.



Figura 22 Minipiezometri PP 16 SS AU

Le celle sono posizionate su tre livelli nelle zone dove l'entità delle sollecitazioni necessita di essere monitorata:

- +3.5 m: 4 celle posizionate orizzontalmente sul lembo interno e 4 sul lembo esterno dei piloni di base;

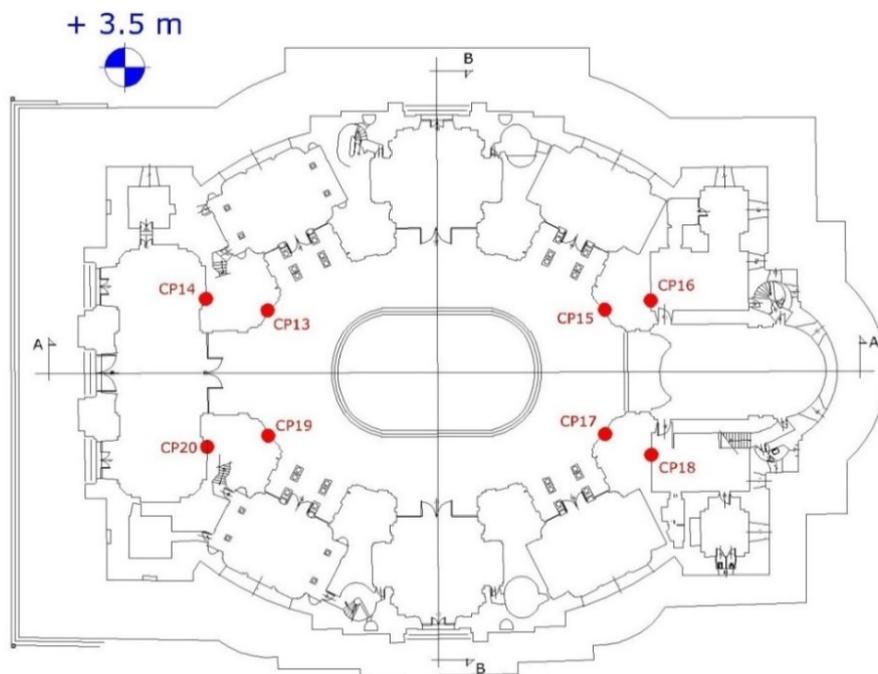


Figura 23 Configurazione planimetrica celle di pressione a quota 3.5 m

- +32 m: 4 celle posizionate orizzontalmente sul lembo interno del tamburo e 4 sui contrafforti;

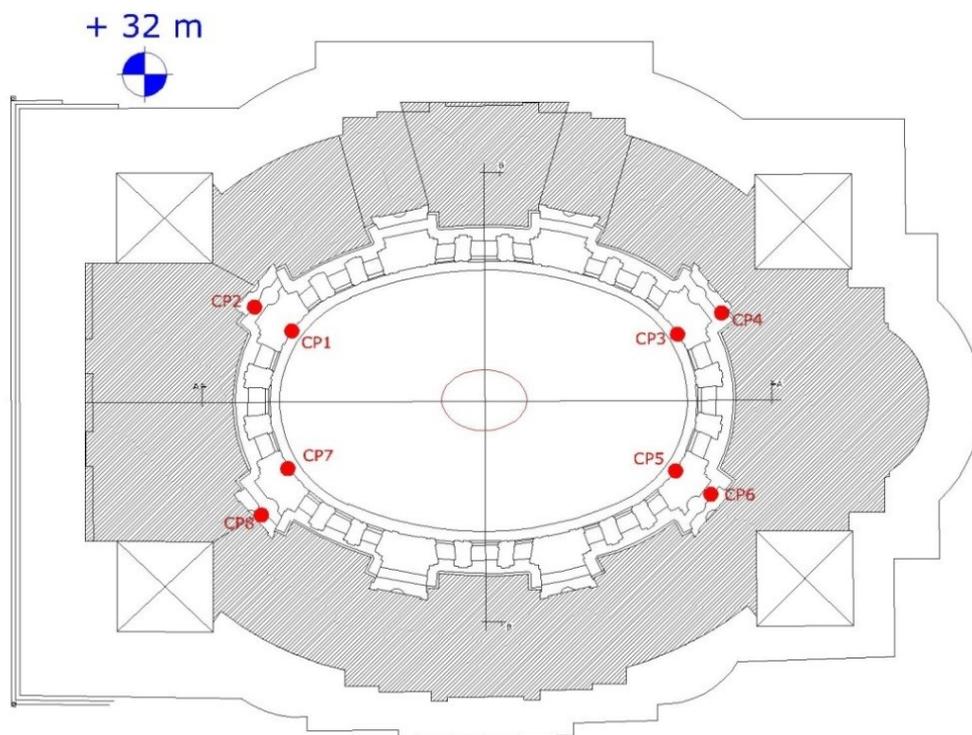


Figura 24 Configurazione planimetrica celle di pressione all'intradosso del tamburo e sui contrafforti

- +50 m: 4 celle in posizione verticale sull'estradosso della cupola.

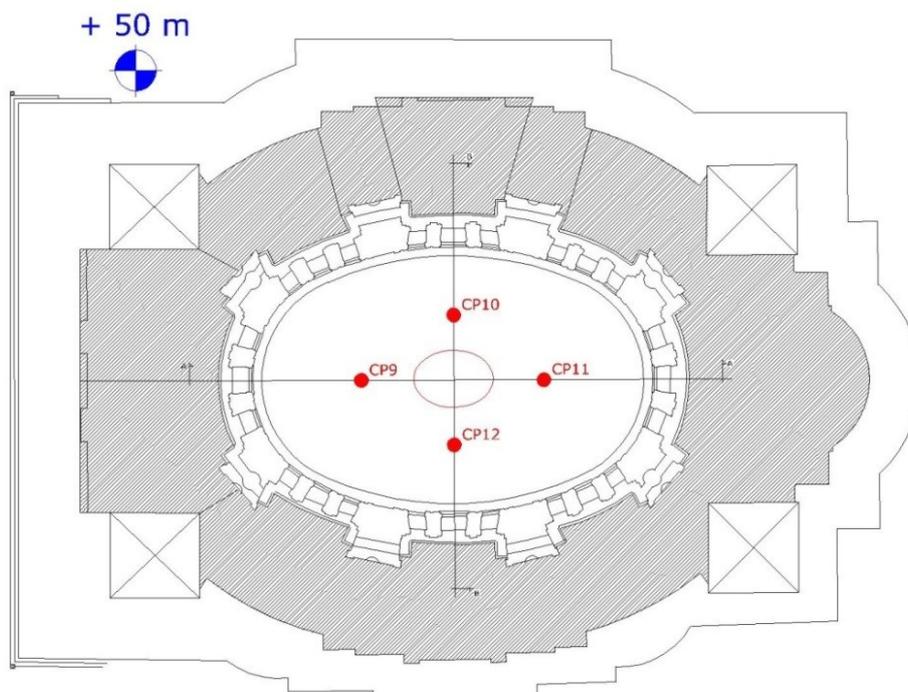


Figura 25 Configurazione planimetrica celle di pressione all'estradosso della cupola

Per quanto concerne le celle di carico, data la conformazione ellittica del tamburo, nel 1982 fu prevista la realizzazione di 14 tratte costituite da barre tipo Dywidag da 32 mm di diametro, sistemate in apposite sedi effettuate per mezzo di perforazioni della muratura esterna a diversa profondità (35÷80 cm). La continuità tra le varie sezioni è stata ottenuta per mezzo di un'apposita piastra articolata, con dimensioni di circa 1.20 m di larghezza, 2 m di altezza e 50 cm di profondità.

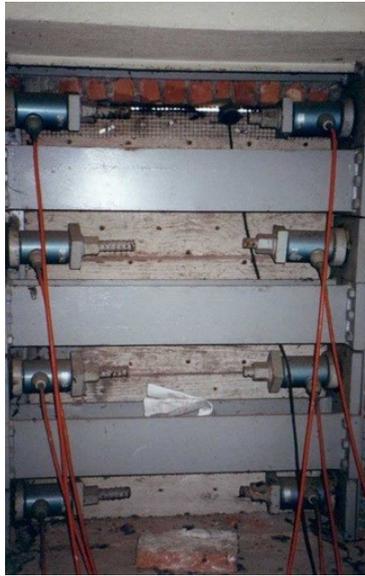


Figura 26 Collegamenti tra i segmenti dei cavi

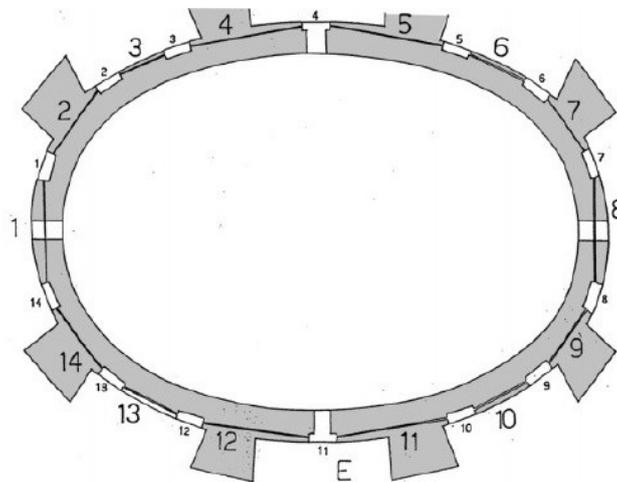


Figura 27 Rappresentazione della disposizione dei cavi

All'estremità di ogni barra sono presenti da un lato celle dinamometriche e dall'altro testate per la regolazione della tensione che può avvenire per mezzo di idonei martinetti piatti forati. Le 56 celle di carico installate sono celle da 60 t di fondo scala tipo "PRE60" della ditta "Huggenberg" di Zurigo.

Al fine di poter eventualmente separare le variazioni di carico e tensione dovute al clima, da quelle attribuibili ai movimenti della struttura, sono stati inseriti 24 termometri all'interno della muratura e in corrispondenza delle barre di cerchiaggio.

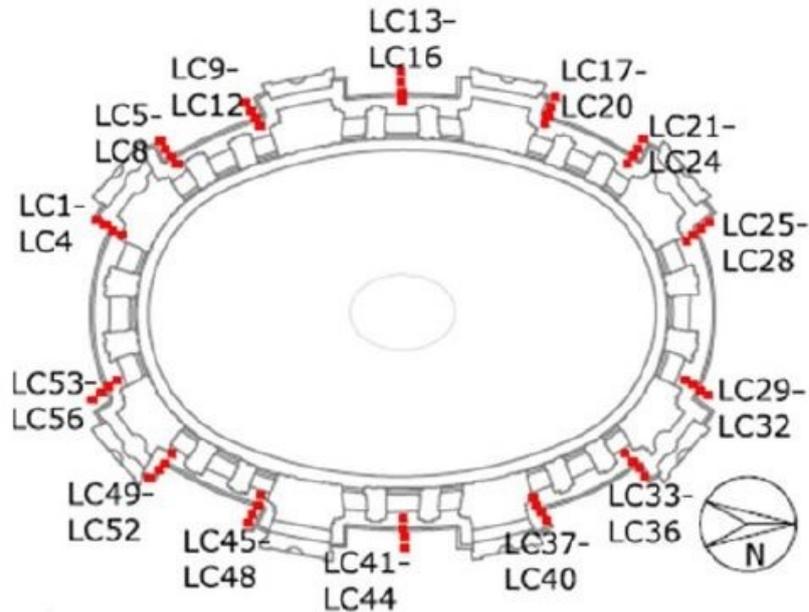


Figura 28 Rappresentazione della disposizione delle celle di carico

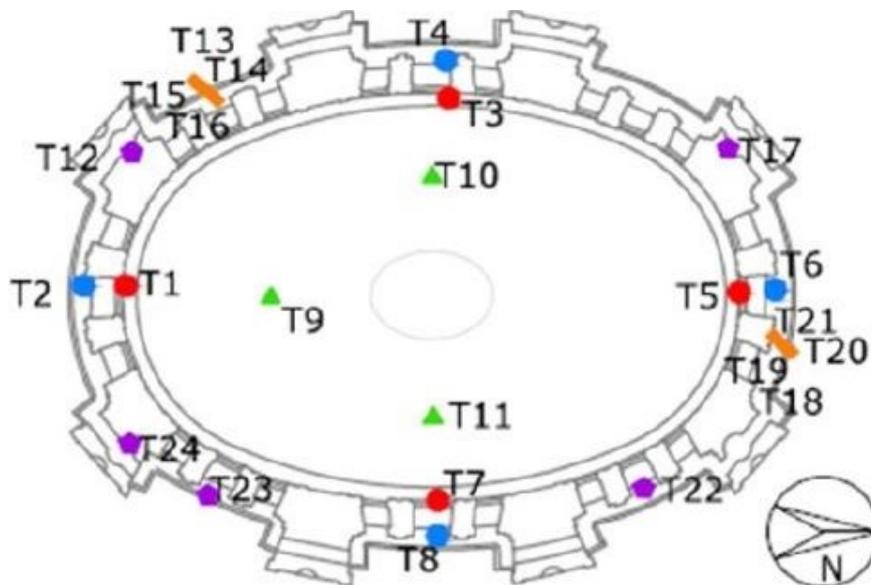


Figura 29 Rappresentazione della disposizione dei termometri

I termometri sono così posizionati:

- 4 termometri posizionati lungo l'ellisse interna in corrispondenza della parte superiore del tamburo (32 m): T1, T3, T5, T7;
- 3 termometri posizionati lungo il parallelo interno della cupola (50 m): T9, T10, T11;

- 4 termometri posizionati lungo l'ellisse esterno in corrispondenza della parte superiore del tamburo: T2, T4, T6, T8, T17, T22, T23, T24;
- 2 gruppi di termometri, ognuno composto da 4 termometri, posizionati sulle barre: T13, T14, T15, T16 e T18, T19, T20, T21.

Per monitorare la convergenza della cupola e valutare la geometria globale della struttura sono stati installati sui due assi principali due fili di materiale differente per compensare la dilatazione termica dei fili stessi.

Il filo in invar possiede un coefficiente di dilatazione termica 10 volte inferiore rispetto a quello di acciaio inox tradizionale. A causa della lunghezza (35 e 24 m) non è possibile conoscere la temperatura effettiva dei fili; ciò si può però compensare giocando sulla differenza dei coefficienti di dilatazione.

Due estensimetri, posizionati in corrispondenza della fine di ognuno dei due cavi che corrono lungo l'asse maggiore e l'asse minore della cupola, misurano la variazione delle dimensioni della cupola.

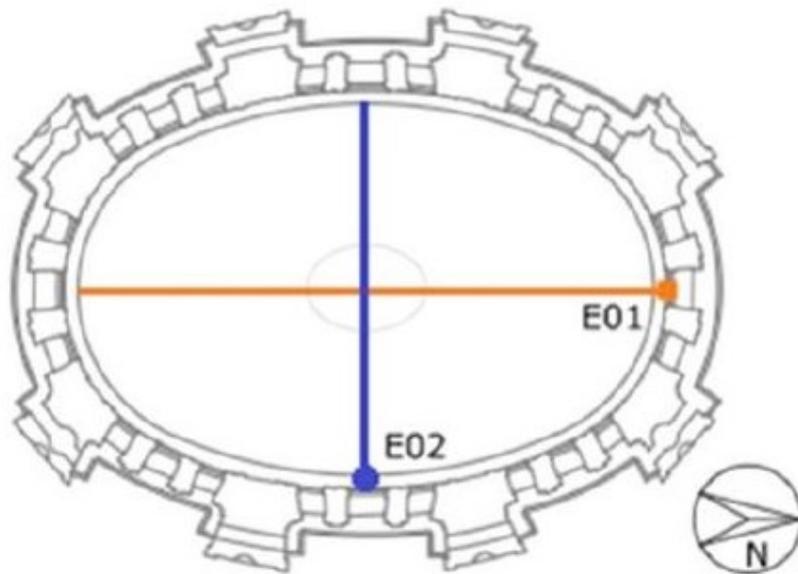


Figura 30 Rappresentazione disposizione fili per la convergenza

Per il controllo del livello della falda acquifera presente al di sotto delle fondazioni del Santuario, sono stati installati 3 piezometri ad una profondità di 10 m dal piano campagna. Per ogni foro sono stati inseriti due tubi in plastica: quello più grande è stato utilizzato per il posizionamento del piezometro, mentre l'altro per l'eventuale immissione del freaticometro per la misura di verifica manuale. E' stato inoltre installato un misuratore di livello ad ultrasuoni per la verifica del livello dell'acqua presente nella cisterna di raccolta dei canali di drenaggio.

Fino al 2004 l'acquisizione dei dati era affidata a due unità "BABUC". I dati erano scaricati tramite modem collegato ad una linea telefonica dedicata. Per la trasformazione analogico/digitale del segnale

era presente un convertitore RS485/RS232. Per minimizzare al massimo le cadute di tensione dovute alla resistenza ohmica dei cavi dei fessurimetri e dei sensori di temperatura, fu necessario impiegare cablaggi di sezione notevole. Ciò comportò però problemi logistici e fisici per i collegamenti al sistema di acquisizione. Per questo motivo è stato realizzato un aggiornamento del sistema, il quale ha portato ad un'ottimizzazione degli spazi e ad una diminuzione dei rischi dovuti alle cadute di tensione nei cavi.

Sono state installate tre unità di acquisizione e trasmissione delle misure:

- **UAS** (Unità di Acquisizione Superiore), la quale è composta da moduli della “*National Instruments*” serie Field Point, switch per rete LAN e access point per rete wireless;
- **UAP** (Unità di Acquisizione Piezometrica), è l'unità nella quale convergono i dati dei piezometri e dei sensori di livello della cisterna, la connessione in rete wireless è assicurata da un'antenna direzionale che guarda il lato ovest del Santuario;
- **UAC** (Unità di Acquisizione Centrale) è l'unità collocata all'interno del Santuario in un apposito armadio rack. Si compone di un quadro elettrico, un gruppo di continuità (UPS), un quadro di comando di selezione delle celle idrauliche in manuale, un monitor, un controller “*National Instruments – PXI*”, un'unità per la selezione delle celle ed una pompa idraulica. In essa convergono le letture relative a tutti gli strumenti che compongono il sistema di monitoraggio del Santuario.

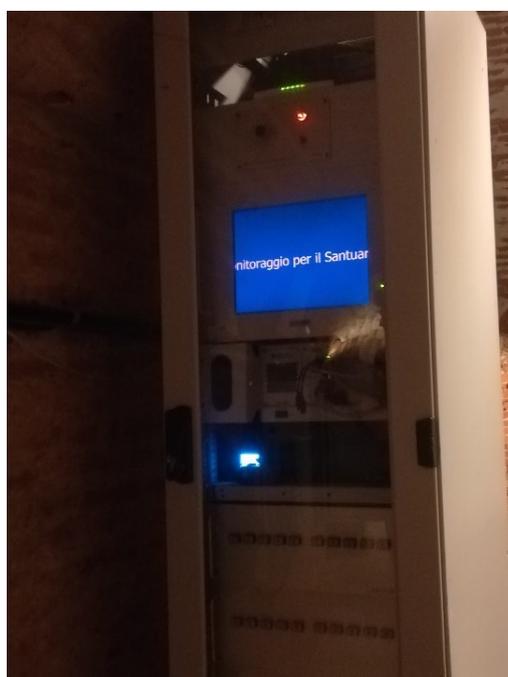


Figura 31 Unità di Acquisizione Centrale per la gestione dei dati del sistema di monitoraggio statico all'interno del Santuario di Vicoforte

Il software di gestione dell'intero impianto è stato sviluppato su piattaforma "National Instruments – LabVIEW".

I dati vengono raccolti ed immagazzinati dal computer posizionato nel Santuario di Vicoforte, e poi dovrebbero essere inviati dalla società Gdtest alla Protezione Civile e al Laboratorio di Dinamica e Ingegneria Sismica del Politecnico di Torino sotto la direzione del Prof. Rosario Ceravolo.

I dati raccolti sono consultabili anche sul sito della società Gdtest che aveva, fino a qualche anno fa, la gestione del sistema di monitoraggio, la quale propone la visualizzazione interattiva della strumentazione posta a controllo del Santuario di Vicoforte. I dati raccolti dal 2004 al 2014 sono visionabili e scaricabili, previa conoscenza delle credenziali di accesso, dal sito della società Gdtest al seguente link <https://www.gdtest.it/progetti/progetti-web-gis/progetti-web-gis-conclusi/dettaglio/santuario-di-vicoforte>. Il progetto di monitoraggio del Santuario di Vicoforte è riportato tra i progetti conclusi; risale infatti ad alcuni anni fa la chiusura del contratto con la società Gdtest di gestione del sistema di monitoraggio statico.

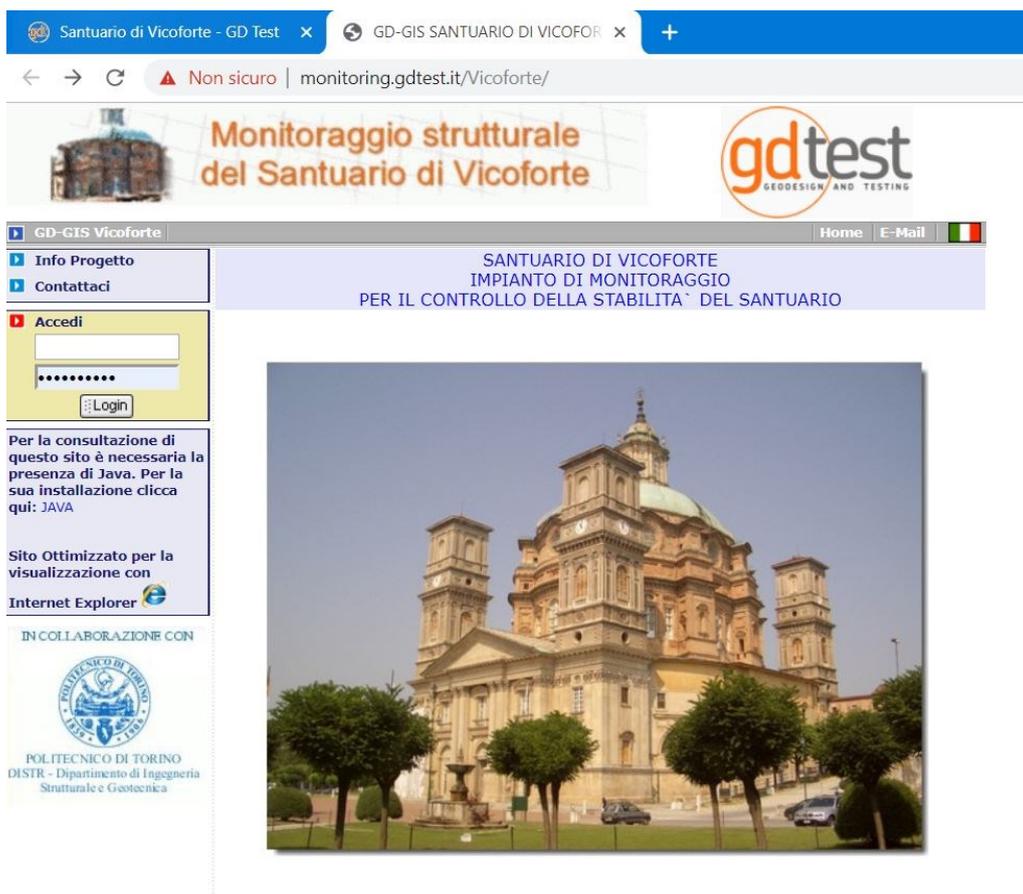


Figura 32 Pagina web sito raccolta dati Gdtest

3.3.2 Il sistema di monitoraggio dinamico

Per costituire un valido ed efficace sistema di monitoraggio è necessario affiancare a quello statico un monitoraggio di tipo dinamico [11].

Questo tipo di monitoraggio può essere effettuato sia attraverso campagne di indagini che occupano un ristretto periodo temporale, sia in modo permanente.

Il monitoraggio dinamico permanente, tramite lettura remota ed istantanea dei parametri (spostamenti, velocità o accelerazioni) rappresentativi del comportamento dinamico della struttura, può consentire la conoscenza in real-time di informazioni utili sullo stato di salute globale dell'opera d'arte, ovvero sull'insorgere o sull'evolversi di gravi stati di danneggiamento.

Una tipica architettura dei sistemi di monitoraggio dinamico è basata sull'impiego di sensori periferici (accelerometri, geofoni ecc.) direttamente connessi tramite cavi ad un sistema di acquisizione centralizzato.

Il ruolo di tale sistema è quello di aggregare, immagazzinare ed elaborare una grande mole di dati dinamici costituiti da grandezze variabili a seconda del tipo di sensore utilizzato.

I sistemi di monitoraggio possono essere usati per creare un database di misure durante l'intero ciclo di vita della struttura; è evidente l'importanza dell'identificazione dei parametri modali delle strutture sia condizioni di esercizio sia durante eventi sismici.

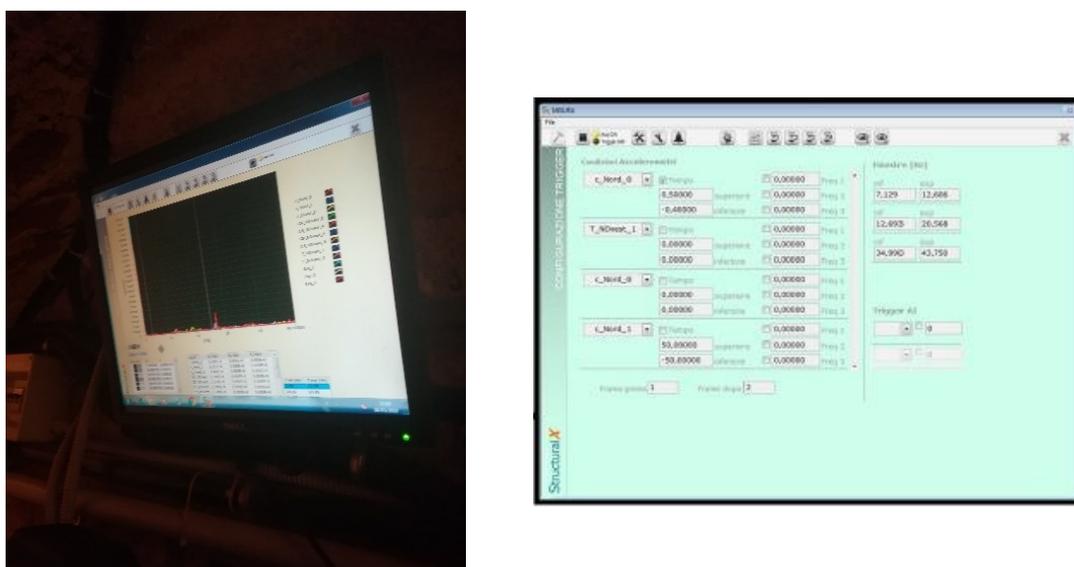


Figura 33 Immagini dell'interfaccia del software di acquisizione e del computer che è adibito alla gestione e alla raccolta dei dati registrati dal sistema di monitoraggio dinamico ed posto all'interno del Santuario di Vicoforte

Nel dicembre 2015, secondo quanto stabilito dagli accordi presi nell'ambito del contratto di ricerca fra il Politecnico di Torino e l'amministrazione del Santuario di Vicoforte, è stato installato il primo lotto del sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte, il quale avrebbe permesso il monitoraggio dell'evoluzione di parametri legati allo stato di salute della struttura, mirando alla conservazione del complesso architettonico che contiene la più grande cupola ovale al mondo. Nel corso del 2016 si è proceduto alla calibrazione del sistema di acquisizione dei dati del sistema di monitoraggio e all'implementazione del protocollo di trasmissione, e nel dicembre del 2016 il sistema ha iniziato ad acquisire correttamente.

La strumentazione di acquisizione dei dati si compone di 12 accelerometri piezometrici mono assiali (PBC Piezotronic, model 393B12, 10 V/g, da 0.15 a 1k Hz, frequenza di risonanza >10000 Hz, temperatura tra -50 e +180 °F) volti ad identificare i modi principali e le accelerazioni agenti alla base della basilica.

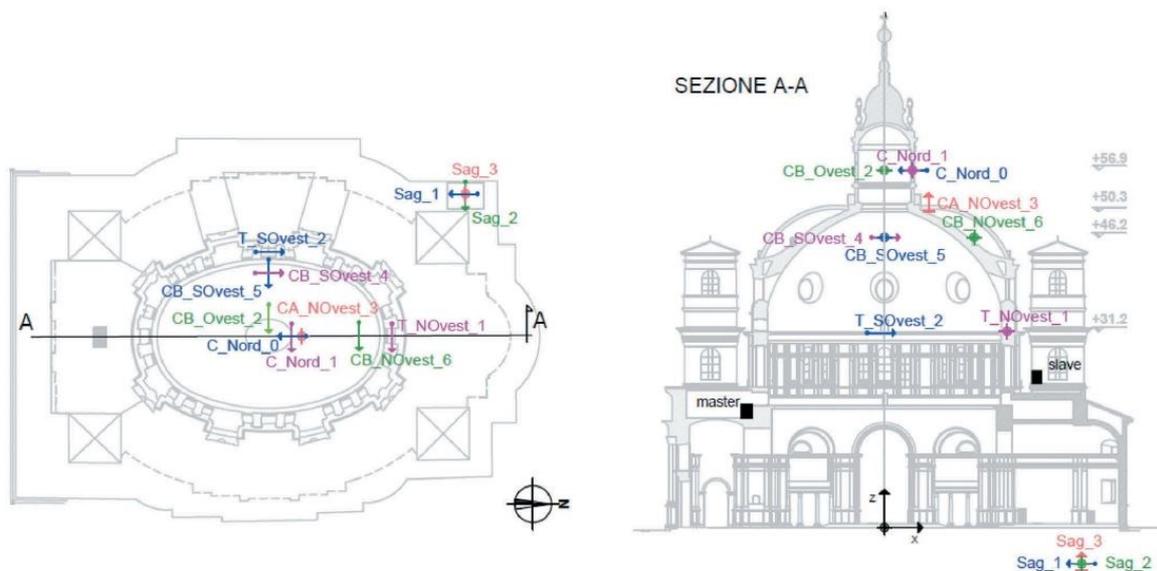


Figura 34 Posizione accelerometri sistema di monitoraggio dinamico

Gli accelerometri sono così posizionati:

- 3 accelerometri ortogonali posti alla base della cripta per registrare le accelerazioni al suolo (Sag_1, Sag_2, Sag_3);
- 2 accelerometri sono posizionati alla base della cupola a 30 m di altezza (T_Novest_1; T_Sovest_2);
- 3 accelerometri sono posizionati sulla cupola a quota 45 m (CB_Sovest_4, CB_Sovest_5, CB_Sovest_6);

3. La Basilica Regina Montis Regalis di Vicoforte (CN)

- 1 accelerometro verticale è posizionato alla base della lanterna a 50 m di altezza (CA_Novest_3);
- 3 accelerometri sono posti a metà altezza della lanterna (CB_Ovest_2, C_Nord_0, C_Nord_1).

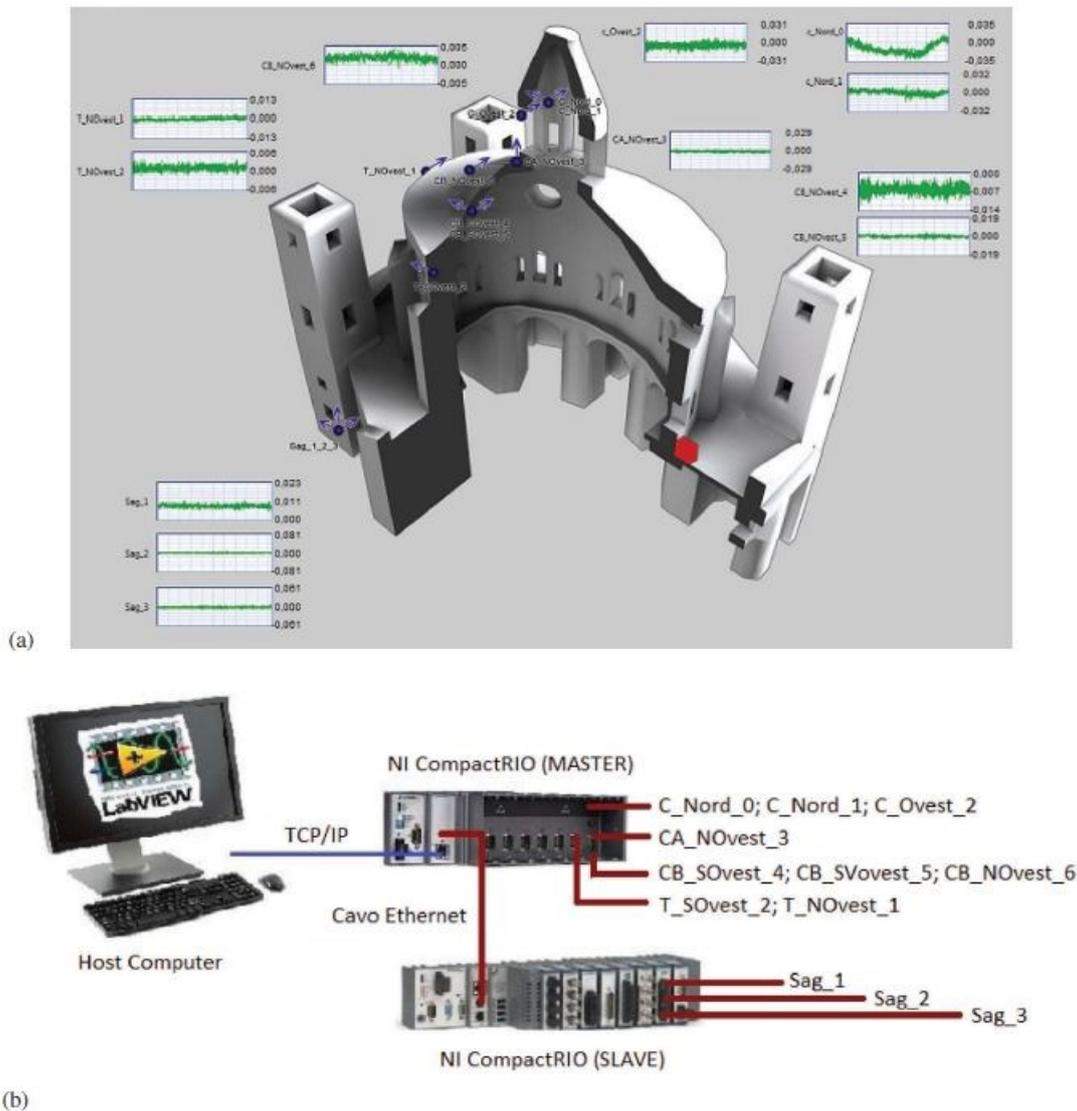


Figura 35 Sistema di acquisizione dei dati dei sensori(a) e del sistema master/slave(b)

Il sistema è stato realizzato secondo uno schema di acquisizione Master&Slave al fine di limitare la lunghezza dei cavi a 50 m e quindi limitare gli effetti di distorsione del segnale. All'unità di acquisizione master confluiscono direttamente i dati raccolti dagli accelerometri posti in corrispondenza del tamburo, della cupola e della lanterna, poi trasmesse all'elemento slave e poi all'unità di acquisizione principale.

La catena di misura si compone di :

- accelerometri;
- schede di acquisizione;
- cavi coassiali;
- scheda;
- compactRIO per l'alloggiamento delle schede di acquisizione;
- cavi ethernet per il collegamento in serie del compactRIO;
- PC di controllo e compact RIO o PXI;
- modem ADSL per la trasmissione dati;
- GPS per la sincronizzazione dei tempi dei vari accelerometri.

tempo	c_Nord_0	c_Nord_1	c_Ovest_2	CA_Novest_3	CB_Sovest_4	CB_Sovest_5	CB_Novest_6	T_Novest_1	T_Sovest_2	Sag_1	Sag_2	Sag_3
0.000	-0.007386	0.004116	0.005597	0.000622	-0.007844	0.006943	0.005060	0.001133	0.008646	0.012207	0.003351	0.000
0.010	-0.007239	0.004405	0.004297	0.001725	-0.006784	0.006939	0.004719	0.002669	0.008833	0.011555	0.002873	-0.000
0.020	-0.007018	0.004511	0.003552	0.002523	-0.005282	0.006485	0.004740	0.002723	0.007398	0.011899	0.002516	0.000
0.030	-0.008295	0.003303	0.003786	0.002348	-0.005327	0.007169	0.004148	0.002841	0.009254	0.012259	0.004770	-0.000
0.040	-0.008510	0.002743	0.006895	0.003229	-0.006241	0.006271	0.004597	0.003034	0.009188	0.011632	0.004056	0.000
0.050	-0.007189	0.003057	0.008340	0.003040	-0.008050	0.007081	0.004360	0.003139	0.008185	0.011867	0.002460	0.001
0.060	-0.007062	0.003786	0.006003	0.001828	-0.009294	0.007134	0.004459	0.003074	0.008167	0.012070	0.003536	0.000
0.070	-0.007700	0.003677	0.004972	0.002288	-0.009689	0.007149	0.004146	0.001848	0.008385	0.011578	0.003497	0.000
0.080	-0.007116	0.003499	0.005022	0.002944	-0.008099	0.008198	0.004641	0.001214	0.008000	0.011479	0.004298	0.000
0.090	-0.004986	0.005592	0.004783	0.003914	-0.007257	0.007402	0.005215	0.001101	0.008684	0.011605	0.002825	0.000
0.100	-0.007820	0.003709	0.006195	0.001976	-0.006534	0.007505	0.004077	0.001248	0.008695	0.012244	0.004688	0.000
0.110	-0.006812	0.004052	0.007057	0.003344	-0.006196	0.007745	0.005661	0.001902	0.008910	0.011790	0.003707	0.000
0.120	-0.008635	0.003959	0.007616	0.002665	-0.006010	0.007742	0.004980	0.001537	0.008355	0.012139	0.004240	0.000
0.130	-0.008399	0.004560	0.006744	0.000663	-0.006184	0.007161	0.004734	0.001598	0.008479	0.011333	0.002388	0.001
0.140	-0.007250	0.004228	0.007794	0.000089	-0.005328	0.007168	0.004896	0.001785	0.008175	0.012743	0.004196	-0.000
0.150	-0.006707	0.003101	0.005833	0.001375	-0.006347	0.006994	0.005173	0.001572	0.008475	0.010676	0.002700	-0.000
0.160	-0.006628	0.005642	0.005332	0.001671	-0.005924	0.006741	0.004465	0.001844	0.008217	0.012091	0.004327	-0.000
0.170	-0.008359	0.003651	0.003875	0.003606	-0.007472	0.007200	0.004931	0.002664	0.009397	0.011765	0.003101	0.000
0.180	-0.008063	0.005181	0.005178	0.003578	-0.009294	0.007884	0.004191	0.002461	0.008258	0.012142	0.004992	0.000
0.190	-0.006117	0.004752	0.006430	0.004307	-0.009522	0.008124	0.004782	0.002607	0.007938	0.012075	0.002670	0.000
0.200	-0.009079	0.004202	0.006576	0.003272	-0.009460	0.007745	0.004410	0.002957	0.008364	0.012852	0.003737	0.001
0.210	-0.008221	0.004011	0.005403	0.002670	-0.007813	0.007633	0.004680	0.003341	0.008406	0.012008	0.003303	-0.000
0.220	-0.011415	0.002745	0.006262	0.002164	-0.007272	0.007467	0.005076	0.002636	0.008113	0.012940	0.004675	0.001
0.230	-0.007481	0.003994	0.008257	0.002603	-0.006506	0.006880	0.005191	0.001865	0.008458	0.011578	0.003076	0.000
0.240	-0.004612	0.005577	0.006086	0.002133	-0.005757	0.006976	0.005217	0.001970	0.008424	0.011762	0.003701	0.001
0.250	-0.005390	0.002333	0.005335	0.002007	-0.006290	0.006782	0.004353	0.000878	0.008362	0.011296	0.003287	0.001
0.260	-0.006093	0.003672	0.004238	0.001438	-0.005826	0.007385	0.005129	0.001153	0.008377	0.011349	0.004056	0.000
0.270	-0.007680	0.005305	0.005061	0.001805	-0.005643	0.007054	0.004806	0.001621	0.007730	0.011341	0.003378	0.000
0.280	-0.006427	0.003858	0.006215	0.001744	-0.004805	0.006908	0.005014	0.001891	0.008040	0.012733	0.004272	0.001
0.290	-0.009617	0.002533	0.009508	0.002003	-0.005604	0.007176	0.004899	0.001847	0.008285	0.012866	0.003336	-0.000
0.300	-0.009342	0.003641	0.007406	0.002371	-0.007058	0.007828	0.004830	0.002389	0.009179	0.012834	0.003629	-0.000
0.310	-0.008074	0.003047	0.006060	0.002797	-0.006143	0.006697	0.004453	0.002428	0.008419	0.011521	0.003304	-0.000
0.320	-0.005291	0.003312	0.003793	0.002896	-0.008259	0.006294	0.004594	0.002781	0.008762	0.011974	0.002703	0.001
0.330	-0.006837	0.003277	0.005099	0.003835	-0.006639	0.008090	0.005540	0.002411	0.008500	0.012006	0.002898	-0.000
0.340	-0.008908	0.005093	0.006547	0.004615	-0.009282	0.008238	0.004946	0.002395	0.007995	0.011536	0.003440	0.000
0.350	-0.003937	0.005254	0.006456	0.004198	-0.009059	0.006776	0.005175	0.001477	0.007382	0.011816	0.003574	0.000
0.360	-0.005176	0.003915	0.005178	0.002879	-0.005761	0.007045	0.005052	0.002779	0.008213	0.011704	0.003594	0.001
0.370	-0.008663	0.003608	0.007885	0.001979	-0.008177	0.007297	0.004238	0.002142	0.008511	0.011441	0.003912	0.001

Figura 36 Esempio file .txt dei segnali registrati

I dati acquisiti e gestiti dal software StructuralX sono quindi trasmessi al Laboratorio di Dinamica ed Ingegneria Sismica del Politecnico di Torino, alla Protezione Civile e all'Osservatorio Sismico di Strutture. Il sistema di acquisizione è impostato in modo da registrare i dati secondo due criteri : ad intervalli di tempo e al superamento di un prestabilito valore soglia. Il sistema registra infatti segnali lunghi 20 min ad intervalli di 1 ora oppure quando si hanno delle accelerazioni al suolo superiori a 0.042g, che corrisponde al valore di Peak Ground Acceleration in condizioni di Stato Limite di Danno e periodo di ritorno di 50 anni, in quest' ultimo caso per registrare la risposta dinamica del Santuario in caso di eventi sismici.

3. La Basilica Regina Montis Regalis di Vicoforte (CN)

I segnali registrati dal sistema di monitoraggio dinamico vengono salvati dall' Unità di Acquisizione Centrale sotto forma di file .txt, nel quale sono presenti i valori di accelerazione registrati dai 12 canali per una durata di 20 min ogni ora ad intervalli di 0.01 secondi.

4. Identificazione dinamica lineare

4.1 Teoria dell' identificazione dinamica

L'analisi modale sperimentale sta acquisendo sempre maggiore rilevanza come strumento per l'esecuzione di analisi strutturali adeguate e la valutazione del comportamento effettivo della struttura. Lo scopo del monitoraggio strutturale di opere civili non consiste solo nell'identificazione di danni improvvisi o progressivi ma anche nel monitorare le prestazioni delle strutture in condizioni di esercizio o durante particolari fenomeni.

L'identificazione strutturale è una disciplina che riveste oggi una grande importanza nella caratterizzazione di quei parametri che definiscono il comportamento meccanico delle strutture. Infatti, se in generale i parametri meccanici inerziali e di rigidità vengono considerati noti, nel caso dell'identificazione si determina il rapporto tra eccitazione e risposta della struttura (ossia i parametri stessi) a partire dai dati (accelerazioni, velocità, spostamenti etc..) acquisiti durante le prove sperimentali. Le informazioni ottenute vengono quindi adoperate per la calibrazione dei modelli delle strutture reali (come ponti, edifici, torri etc...).

Nel corso degli anni si sono sviluppate diverse tecniche di identificazione strutturale, ciascuna caratterizzata da un proprio algoritmo di calcolo. Questi algoritmi acquisiscono le accelerazioni dalle prove sperimentali e sottopongono la struttura a eccitazioni sinusoidali, rumore ambientale (traffico e vento).

Le tecniche di identificazione strutturale possono essere classificate secondo diversi criteri [12]:

- Dominio
 - Metodi nel dominio del tempo
 - Metodi nel dominio delle frequenze
 - Metodi nel dominio combinato tempo/frequenza

I primi ad essere stati sviluppati sono stati i metodi nel dominio della frequenza, i quali risultano essere anche quelli più attendibili quando il campo di frequenze ed il numero di modi risultano essere limitati. A seguito dei problemi legati alla finestratura del segnale (leakage) e alle difficoltà rilevate nei sistemi ad elevata densità modale sono stati introdotti i metodi nel dominio del tempo. Questi presentano una maggiore attendibilità dei risultati all'aumentare del numero dei modi di vibrare del segnale all'interno di una larga banda di frequenza. I metodi nel dominio del tempo consentono di identificare sistemi non

lineari in presenza di comportamenti strutturali piuttosto complessi pur presentando il limite di non rappresentare i modi al di fuori del range prestabilito. Infine, riguardo alle tecniche combinate tempo/frequenza, queste risultano essere applicabili anche al caso di segnali non stazionari. Inoltre queste tecniche possono essere viste come sovrapposizione di armoniche modulate nell'ipotesi di stazionarietà locale. È utile quindi sottolineare le differenti opzioni a disposizione, al variare del numero di modi, dell'input/output e della tipologia di accelerazione.

- Sviluppo analitico
 - Metodi diretti (basati sulla determinazione diretta delle matrici che governano il modello spaziale)
 - Metodi indiretti (basati sulla determinazione dei parametri modali del sistema)
- Numero dei modi
 - Studio sistemi a singolo grado di libertà
 - Studio di sistemi a multipli gradi di libertà
- Punti di Input/output
 - SISO (singolo input e singolo output)
 - SIMO (singolo input e molteplice output)
 - MISO (molteplice input e singolo output)
 - MIMO (molteplice input e molteplice output)
- Tipologia di eccitazione
 - Eccitazione artificiale nota (vibroдина o shaker)
 - Eccitazione naturale incognita (rumore ambientale, vento, terremoto, traffico).

L'analisi modale preliminare consente, a partire dalla realizzazione di un modello, di ipotizzare il comportamento dinamico di una struttura e definire un'architettura del monitoraggio in grado di fornire informazioni utili sul manufatto; ma è solo l'analisi modale sperimentale che permette di renderlo efficace da un punto di vista dinamico in maniera affidabile. Questo approccio consiste nell'applicazione della tecnica di identificazione strutturale al segnale acquisito in termini di accelerazioni, successivamente alla realizzazione delle prove sperimentali. In generale è opportuno ricordare che i possibili approcci nell'analisi modale sono due:

- Approccio analitico: è possibile a partire dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei materiali, risolvendo il problema agli autovalori, giungere alla determinazione dei parametri modali del sistema (analisi modale preliminare).
- Approccio sperimentale: a partire dalla misura dell'input dinamico e della risposta della struttura, si calcolano i parametri dinamici della stessa (identificazione della struttura).

ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE

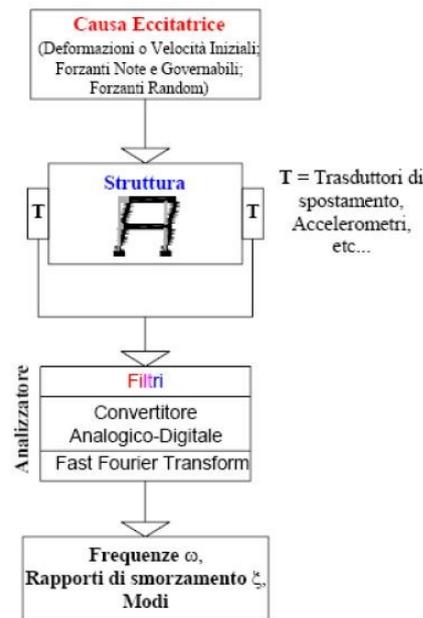


Figura 37 Diagramma di flusso analisi modale sperimentale

Obiettivo dell'analisi modale è la definizione del comportamento dinamico di una struttura che viene a dipendere da:

- Frequenze proprie;
- Modi di vibrazione;
- Coefficienti di smorzamento.

Pertanto, come accennato in precedenza, l'analisi modale sperimentale, conosciuta anche come problema inverso, permette di caratterizzare intrinsecamente la struttura in oggetto note la risposta della costruzione e l'input dinamico. Inoltre è interessante sottolineare come per comportamento dinamico di una struttura si intenda una sorta di impronta digitale; esso, infatti, viene a dipendere esclusivamente dalle caratteristiche intrinseche del manufatto (masse, rigidzze, smorzamento, vincoli etc...) e non dai carichi applicati; al contrario la comparsa di modifiche all'interno dell'edificio come ad esempio i danni

strutturali può determinare dei cambiamenti nel comportamento dinamico della struttura in termini di frequenze e modi propri di vibrare. Le ipotesi alla base della teoria dell'analisi modale sperimentale sono:

- Linearità: applicabilità del principio di sovrapposizione degli effetti nella combinazione delle varie risposte della struttura.
- Stazionarietà: caratteristiche dinamiche della struttura non variano nel tempo;
- Osservabilità: misurabilità dei dati necessari per definire le caratteristiche dinamiche della struttura.

Oggi l'analisi modale riscontra una sempre maggiore applicazione nei vari codici FEM tuttavia molto spesso i valori dei parametri che si ottengono da questi software risultano essere divergenti da quelli reali. Le ragioni di questa differenza tra il comportamento del modello e quello della struttura reale sono dovute a:

- Definizione dei coefficienti di smorzamento; mentre le masse e le rigidità sono facilmente determinabili una volta note le caratteristiche geometriche e le proprietà dei materiali, per quanto riguarda gli smorzamenti, essendo questi variabili, saranno difficilmente rappresentabili all'interno del modello.
- Approssimazioni legate all'interazione fra gli elementi strutturali.
- Discretizzazione della struttura.

4.1.1 Principali tecniche di identificazione

Dopo aver introdotto gli aspetti principali delle tecniche di identificazione strutturale e aver definito i criteri per la loro classificazione è utile fare cenno ad alcune di esse fra quelle nel dominio del tempo ad eccitazione incognita (Output only) [13]:

- Direct System Parameter Identification (DSPI), metodo auto-regressivo.
- Eigensystem Realization Algorithm (ERA) si applica sui segnali di free-decay (oscillazioni libere smorzate). Laddove i segnali risultino essere a input incognito essi vengono trattati attraverso delle funzioni Random Decrement Transform eliminando la parte della risposta dovute alle sollecitazioni stocastiche.

- Stochastic Subspace Identification (SSI) è una tecnica utilizzata per l'identificazione dei sistemi meccanici in cui si adegua un modello lineare alle misure (input-output o output only) ottenute dallo studio del sistema stesso. Questo approccio, in linee generali, verrà approfondito da un punto di vista analitico nei paragrafi successivi, e nel caso studio del Santuario di Vicoforte è stata utilizzato l'algoritmo CVA della famiglia degli algoritmi SSI.

4.2 Cenni sulla tecnica SSI (Stochastic Subspace Identification)

Con Stochastic Subspace Identification si intende una tecnica di identificazione nella quale il modello parametrico viene adeguato direttamente alla serie di dati grezzi forniti nel dominio del tempo. Un modello parametrico è un modello matematico i cui parametri possono essere aggiustati per far sì che esso si adatti ai dati a disposizione. In sostanza si cerca quel set di parametri che è in grado di minimizzare la devianza tra la risposta del sistema prevista e quella misurata. Questo processo è detto di calibrazione.

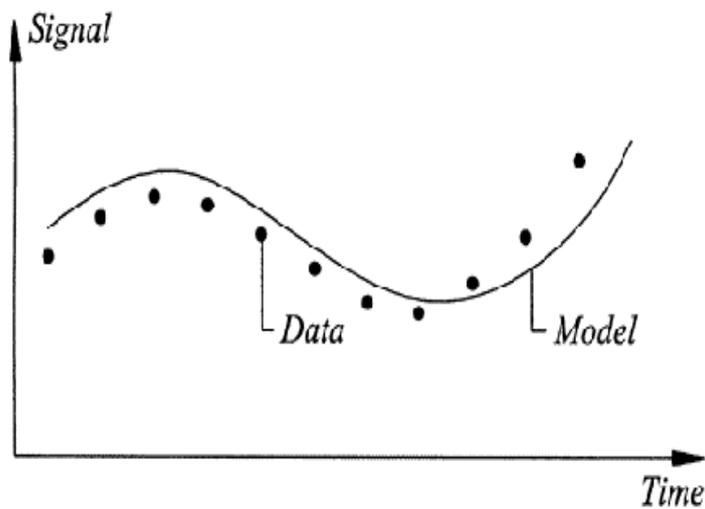


Figura 38 Processo di adeguamento del modello ai dati

Un aspetto fondamentale nella definizione del modello spaziale di stato è la scelta del numero di parametri; esso non deve essere né troppo basso né troppo alto. Nel primo caso si rischia di non modellare correttamente il comportamento del sistema. Se al contrario è troppo alto il modello risulterà sovradeterminato causando una inutile incertezza statistica. Occorre quindi determinare un giusto e ragionevole numero di parametri. Di questi aspetti si deve tenere conto quando nella definizione del modello spaziale si sceglie la dimensione della matrice di transizione $[A]$ (dimensione spaziale). Ovviamente non si sarà mai in grado di effettuare una stima dei parametri corretti al 100%, ma utilizzando una dimensione spaziale non troppo grande si può effettuare un calcolo abbastanza accurato.

4.2.1 Introduzione del modello spaziale: dal continuo al discreto.

Riportiamo ora i passaggi principali relativi alla tecnica di identificazione SSI [14]. Il punto di partenza è la classica formulazione di un sistema fisico avente più gradi di libertà:

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [D]\{\dot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = \{f(t)\}$$

Con:

$\{y(t)\}$ = risposta del sistema

$[M]$ = matrice di massa;

$[D]$ = matrice di smorzamento;

$[K]$ = matrice di rigidità;

$\{f(t)\}$ = fattore di carico (input del sistema).

Per potersi ricondurre ad un sistema temporale in forma discreta il modo più semplice è introdurre la formulazione di spazio di stato in forma:

$$\{\dot{x}(t)\} = \begin{pmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix}$$

Con $\{x(t)\}$ vettore di stato e $\{y(t)\}$ vettore di output.

È possibile scrivere l'algoritmo generale della tecnica di identificazione SSI a partire dall'introduzione della formulazione di spazio di stato in forma continua:

$$\begin{cases} \{\dot{X}(t)\} = [A_c]\{X(t)\} + [B]\{f(t)\} \\ \{Y(t)\} = [C]\{X(t)\} \end{cases}$$

La prima è un'equazione del primo ordine detta equazione di stato in quanto descrive il comportamento dinamico del sistema fisico, mentre la seconda è un'equazione di osservazione perché rappresenta la parte del sistema dinamico che può essere osservata. Inoltre occorre precisare che:

- $\{X\}$ è il vettore di stato ossia rappresenta lo stato interno del sistema nell'istante t ;
- $\{Y\}$ è il vettore di risposta nel dominio continuo del tempo e fa riferimento alla parte osservabile della dinamica del sistema;
- $[A_c]$ è detta matrice di transizione nel dominio continuo del tempo in quanto descrive l'evoluzione del sistema

$$[A_c] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -[M]^{-1}[D] & -[M]^{-1}[D] \end{bmatrix};$$

- $[B]$ è la matrice di carico

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 \\ [M]^{-1} \end{bmatrix};$$

- $[C]$ è la matrice di osservazione che consente il passaggio dal vettore di stato al vettore di risposta del sistema.

Il vantaggio di questa formulazione è che la soluzione può essere ottenuta in maniera diretta come somma di due soluzioni (soluzione generale dell'equazione omogenea + soluzione particolare) :

$$\{x(t)\} = \exp([A_c]t) \{x(0)\} + \int_0^t \exp([A_c](t - \tau)) [B] \{f(\tau)\} d\tau.$$

Per passare al tempo discreto occorre scrivere tutte le variabili come $y_k = y(k\Delta t)$, riscrivendo la soluzione dell'equazione omogenea come:

$$\begin{cases} \{x_k\} = [A_d^k](X_0) \\ \{y_k\} = [C][A_d^k](X_0) \end{cases}$$

Con $[A_d] = \exp([A_c]\Delta t)$ detta matrice di transizione nel dominio discreto del tempo.

La risposta del sistema Y viene normalmente espressa come $Y = [y_1 y_2 \dots y_N]$ dove N rappresenta il numero di dati a disposizione. Nella maggior parte delle tecniche di identificazione nel dominio del tempo, come nel caso della SSI, si parte con la sistemazione delle misure all'interno delle matrici a blocchi di Henkel $[Y_h]$:

$$[Y_h] = \begin{pmatrix} [y_{hp}] \\ [y_{hf}] \end{pmatrix}$$

In particolar modo la sottomatrice $[y_{hp}]$ che fa riferimento agli stati passati mentre $[y_{hf}]$ a quelli futuri. Soffermandoci sulla dimensione della matrice di Henkel, possiamo dire che avrà un numero di colonne pari a $N-2s$ e un numero di righe pari a $2sM$ con:

- s = data shift;
- M = numero di canali;
- N = numero di dati a disposizione

4.2.2 Predizione e Stati di Kalman

Introduciamo ora la matrice di predizione o detta anche proiezione ortogonale. Essa viene introdotta come uno strumento geometrico e può essere considerata come media condizionale. In particolar modo nella tecnica SSI la matrice O definisce la predizione del futuro sulla base del passato:

$$O = E([Y_{hf}]|[Y_{hp}])$$

Questa media condizionale nei processi Gaussiani può essere descritta dalle sue covarianze, e poiché le matrici $[Y_{hf}]$ e $[Y_{hp}]$ definiscono delle covarianze allora:

$$O = Y_{hf} Y_{hp}^T (Y_{hp} Y_{hp}^T)^{-1} Y_{hp}$$

Ciascuna colonna della matrice $[O]$ può essere espressa come:

$$[O_{col}] = [I_s][X_o],$$

Con $[I_s]$ matrice di osservabilità ottenuta alla luce del sistema di equazioni espresso nel dominio discreto del tempo;

$$[I_s] = \begin{bmatrix} [C] \\ [C][A_d] \\ \vdots \\ [C][A_d]^{s-1} \end{bmatrix}$$

Dove il pedice 's' indica la dimensione della matrice di predizione e della matrice a blocchi di Henkel. $\{X_o\}$ è la matrice degli stati di Kalman al tempo t_0 . I cosiddetti stati di Kalman sono semplicemente le condizioni iniziali per tutte le colonne della matrice di predizione $[O]$. Tuttavia, poiché non si conosce la matrice di osservabilità $[I_s]$, non è possibile calcolare gli stati di Kalman in modo diretto. Il metodo consiste nel calcolare la matrice di predizione $[O]$ utilizzando la Singular Value Decomposition (SVD) per la fattorizzazione della matrice di predizione $[O]$:

$$[O] = [U][S][V]^T$$

Con $[U]$ matrice rettangolare unitaria, $[S]$ è una matrice rettangolare con termini reali e non negativi sulla diagonale e infine $[V]$ è una matrice quadrata unitaria.

A questo punto è possibile passare alla definizione delle matrici stimate di osservabilità $[\widehat{I}_s]$ e degli stati di Kalman $[\widehat{X}_o]$.

$$[\widehat{I}_s] = [U][S]^{\frac{1}{2}}$$

$$[\widehat{X}_o] = [S]^{\frac{1}{2}}[V]^T$$

Se si rimuovono la prima e l'ultima riga della matrice di predizione si può stimare la matrice $[\widehat{X}_1]$ per il tempo t_1 . In questo modo possono essere calcolati anche tutti gli altri stati di Kalman, utilizzati per stabilire una formulazione più generale e stimare la parte di rumore relativa alla risposta stocastica. Dopo aver stimato la matrice $[\widehat{I}_s]$, ricordando che 's' è un parametro del modello (data shift), possono essere stimate anche le matrici $[\widehat{A}_d]$ di transizione e $[\widehat{C}]$ di osservazione.

$$[\widehat{I}_s]_{(2:s)}[\widehat{A}_d] = [\widehat{I}_s]_{(1:s-1)}$$

$$[\widehat{C}] = [\widehat{I}_s]_{(1:1)}$$

4.2.3 Estrazione dei parametri modali

Il primo passo per la ricerca dei parametri modali è la risoluzione del problema agli autovalori della matrice $[\widehat{A}_d]$ del sistema:

$$[\widehat{A}_d] = [\Psi][\mu][\Psi]^{-1}.$$

Con $[\Psi]$ matrice degli autovettori del sistema discreto e $[\mu]$ poli nel dominio discreto del tempo. È quindi possibile determinare μ_i a partire dai poli nel dominio continuo del tempo λ_i attraverso la seguente relazione:

$$\mu_i = \exp(\lambda_i).$$

A questo punto si può giungere alle formule dell'analisi modale ed estrapolare quindi pulsazioni, frequenze, coefficienti di smorzamenti e forme modali:

$$\lambda_i = \frac{\ln(\mu_i)}{\Delta T},$$

$$\omega_i = |\lambda_i|,$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi},$$

$$\zeta_i = \frac{Re(\lambda_i)}{|\lambda_i|}.$$

Invece la matrice delle forme modali è ottenuta attraverso la relazione:

$$[\phi] = [C][\Psi]$$

Dove $[\phi]$ è la matrice degli autovettori relativi all'equazione differenziale del secondo ordine mentre $[\Psi]$ è la matrice degli autovettori del sistema nel dominio discreto del tempo. Resta adesso da chiarire la dimensione della matrice a blocchi di Henkel. Come abbiamo visto il numero 's' definisce non soltanto la dimensione della matrice a blocchi di Henkel $[Y_h]$ ma anche quella della matrice di predizione $[O]$. Anche il numero di autovalori del modello, vale a dire l'ordine del modello, dipende da 's'. Generalmente quello che si fa è costruire il diagramma di stabilizzazione variando l'ordine del modello.

Per fare questo occorrerebbe costruire una serie di matrici a blocchi di Henkel di dimensioni differenti, ma risulta molto più semplice variare il numero dei singoli valori utilizzati nelle equazioni per la predizione di $[\widehat{F}_s]$ e $[\widehat{X}_0]$. Così la dimensione della matrice a blocchi di Henkel definisce il massimo ordine del modello e l'ordine reale del modello varia al variare del numero dei valori presi in conto quando viene realizzata la SVD della matrice di predizione O . In conclusione, il massimo numero di autovalori viene aggiustato al fine di riportarlo ad un livello ragionevole in modo tale da incorporare la necessaria gamma di modelli.

A questo punto risulta fondamentale introdurre un metodo utile per verificare il disaccoppiamento modale tra i diversi modi di vibrare della struttura. Questo metodo si basa sulla determinazione del Modal Assurance Criterion (MAC) e può essere definito in riferimento all' i -esimo e j -esimo modi di vibrare della struttura sui gradi di libertà strumentati come:

$$MAC_{ij} = \frac{(\{\phi_i\}^T \{\phi_j\})^2}{(\{\phi_i\}^T \{\phi_i\})(\{\phi_j\}^T \{\phi_j\})}$$

Con $\{\phi_i\}$ e $\{\phi_j\}$ autovettori corrispondenti all' i -esimo e j -esimo modi di vibrare della struttura. In conclusione, per come è stato definito il MAC, valori bassi di esso (vicini ad 1) evidenziano una certa indipendenza tra le coppie di modi di vibrare analizzate, viceversa valori alti sottolineano uno scarso disaccoppiamento modale.

4.3 Procedura di identificazione modale automatica per il Santuario di Vicoforte

Negli ultimi anni è stata elaborata una procedura automatica di identificazione modale a partire dai segnali registrati dal sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte, elaborando per la prima volta una strategia di Continuous Vibration-Based Structural Health Monitoring (CVB-SHM) sulla cupola ovale più grande al mondo, al fine di controllare la salute strutturale dell'edificio. Il processo è completato da una procedura di analisi di diagrammi di stabilizzazione e di analisi automatica di clustering [15].

Si tratta una tecnica di identificazione lineare facente parte della famiglia delle tecniche di Operational Modal Analysis (OMA), in quanto nel caso studio in questione l'unico input presente ad eccitare la struttura è il cosiddetto rumore bianco, e per questo incognito.

Nel corso degli anni sono stati proposti numerosi algoritmi per determinare i parametri modali delle strutture a partire da segnali registrati. Solitamente questi parametri sono già noti in precedenza, poiché risulta necessario un confronto tra i risultati ottenuti dal modello agli elementi finiti e quelli ottenuti attraverso l'identificazione, per riuscire ad individuare al meglio i modi di vibrare reali della struttura.

I segnali registrati dal sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte sono stati automaticamente processati per definire le frequenze e i modi di vibrare principali della struttura.

```

1 % *****
2 % IDENTIFICAZIONE DINAMICA VICOFORTE SSI
3 % *****
4
5 % Consente di effettuare l'identificazione dinamica del Santuario di Vicoforte
6 % mediante il metodo Stochastic Subspace Identification e di estrarre, dopo
7 % una verifica di stabilità dei modi identificati, le frequenze proprie del Santuario.
8
9 % L'agorismo restituisce i seguenti dati (saveS.data):
10 % 1) Energia del segnale [Energy] + RMS del segnale [RMS]
11 % 2) Perc. ottimale del singolo segnale [PerSign] + Max Accelerazione misurata [MaxAcc]
12 % 3) Segnale tagliato per assegnata lunghezza [signalCUT]
13 % 4) Identificazione SSI [ID]
14 % 5) Modi identificati + forma modale [clust]
15 % 6) Modi identificati + forma modale + statistiche [full_id]
16 % 7) Modi identificati: Cluster finale [ID_PBS]
17
18 % e i loro relativi grafici (saveS.fig):
19 % 1) Segnale acquisito
20 % 2) Segnale con rimozione media e trend
21 % 3) Segnale tagliato
22 % 4) Segnale con rimozione frequenze
23 % 5) PSD
24 % 6) Stabilization diagram: f/damp. (tutte le frequenze)
25 % 7) Stabilization diagram: f/ord. (tutte le frequenze)
26 % 8) Stabilization diagram: f/ord. + PSD
27 % 9) Stabilization diagram: f/damp. (frequenze stabili)
28 % 10) Cluster Bar diagram: numero di frequenze che compongono un cluster (tutte le frequenze)
29 % 11) Cluster Stabilization diagram: f/ord. (freq. stabili + outliers)
30 % 12) Cluster diagram: f/damp. (tutti i cluster colorati)
31 % 13) Cluster diagram: f/damp. (solo cluster "stabili" colorati)
32 % 14) Cluster diagram (solo cluster) + Bar diagram
33 % 15) Cluster diagram: f/ord. + modi identificati dal clustering

```

Figura 39 Schermata codice implementato su Matlab®

Il tutto è stato realizzato implementando un codice su Matlab®, che segue la procedura illustrata in figura 40.

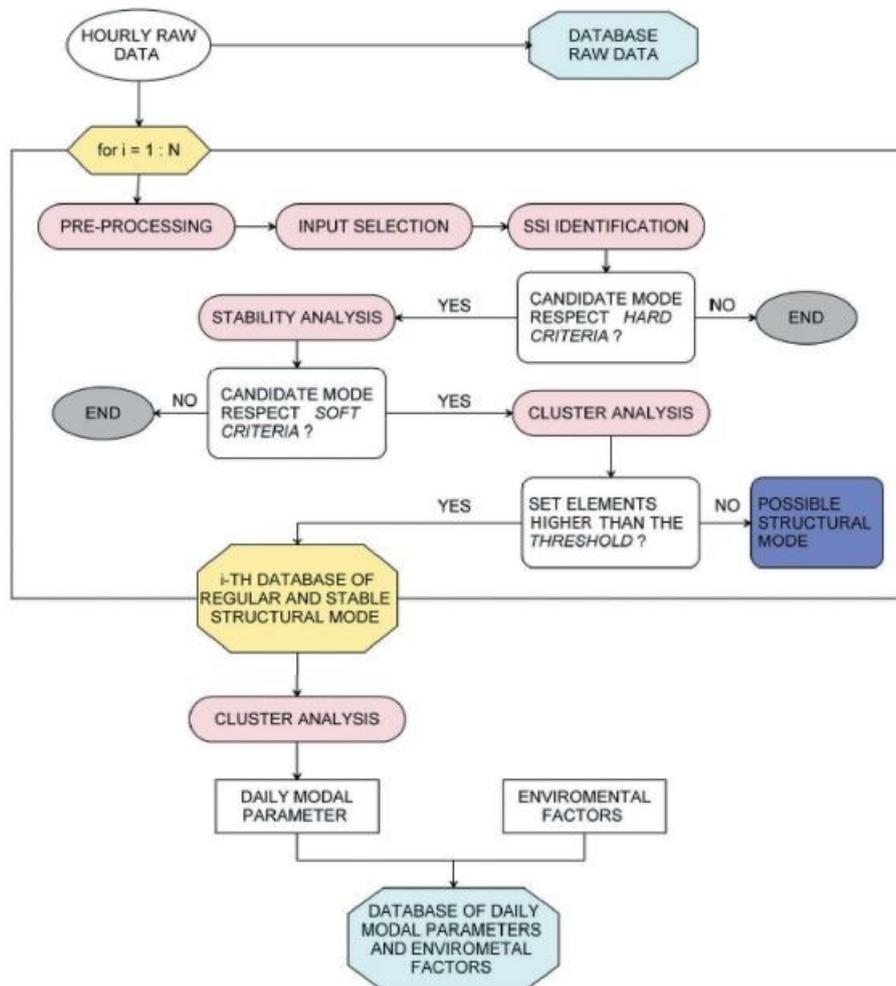


Figura 40 Diagramma di flusso del codice per l'implementazione automatica

4.3.1 Selezione dati di input ed influenza fattori operativi

Il codice parte dalla fase di pre-trattamento dei dati acquisiti, utilizzando metodi di de-trending, decimazione e filtraggio.

In questa fase si è dovuto fare delle scelte, influenzate principalmente dai fattori operativi che possono più o meno influenzare la qualità del segnale registrato, e quindi rendere troppo elevato lo sforzo computazione rispetto ai benefici che questo può dare in termini di risultati [16].

Il primo fattore operativo preso in considerazione è il traffico. Si è deciso di considerare esclusivamente i dati acquisiti dalle 06:00 alle 18:00, in quanto si è osservato che le analisi basate sui dati acquisiti dalle

18:00 alle 06:00 consentono di identificare un numero nettamente inferiore di frequenze, probabilmente a causa del traffico giornaliero che eccita maggiormente la struttura, quasi assente nella fascia oraria serale e notturna. Questo risultato è coerente con i valori più bassi di Root Mean Square (RMS) legati alle registrazioni notturne.

Il valore di RMS è stato inoltre utilizzato come strumento per selezionare l'intervallo di 5 min da analizzare, al posto dell'intero segnale da 20 min, al fine di ridurre i tempi di elaborazione computazionale; si utilizza infatti la porzione di segnale con RMS più elevato nella maggior parte dei canali. In generale, nonostante i risultati ottenuti dall'identificazione di segnali lunghi 20 min sembrano essere più stabili, i vantaggi ottenuti non sono tali da giustificare un onere computazionale così elevato.

Un altro aspetto operativo preso in considerazione è il suono delle campane. Si è infatti impostato il sistema di monitoraggio dinamico in modo che potesse registrare i 20 min/h a partire dal decimo minuto di ogni ora, per evitare che il suono delle campane del santuario possa influenzare il segnale registrato.

Sarebbe interessante valutare l'influenza dei dati operativi quali la quantità di traffico, automobilistico e pedonale, nei pressi del Santuario, o le visite di turisti e fedeli all'interno dell'edificio; purtroppo questo non è stato possibile in quanto non esistono dei dati raccolti e registrati legati a questi fattori.

4.3.2 Procedura SSI

L'algoritmo di identificazione del sistema di elaborazione è un output-only Stochastic Subspace Identification (SSI), in particolare è stato implementato il terzo algoritmo considerato dal teorema unificante di Van Overschee e De Moor [13], noto come Canonical Variate Analysis (CVA). L'algoritmo viene eseguito più volte modificando l'ordine del modello, che viene fatto variare da 70 a 120, intervallo nel quale il numero di frequenze stabili identificate aumentano con l'ordine del sistema.

4.3.3 Eliminazione modi spuri

Ai risultati ottenuti dall'identificazione vengono applicati criteri di hard-validation e di stabilità per rimuovere i modi spuri. In particolare vengono rimossi i modi caratterizzati da un rapporto di spostamento superiore al 10% in quanto non fisicamente possibili per la struttura in esame.

I restanti modi vengono analizzati attraverso diagrammi di stabilizzazione, attraverso i quali possiamo vedere i modi individuati in funzione dell'ordine del modello; i modi individuati nella maggior parte dei modelli e con valori consistenti di frequenza, smorzamento e spostamenti modali sono considerati stabili e quindi reali.

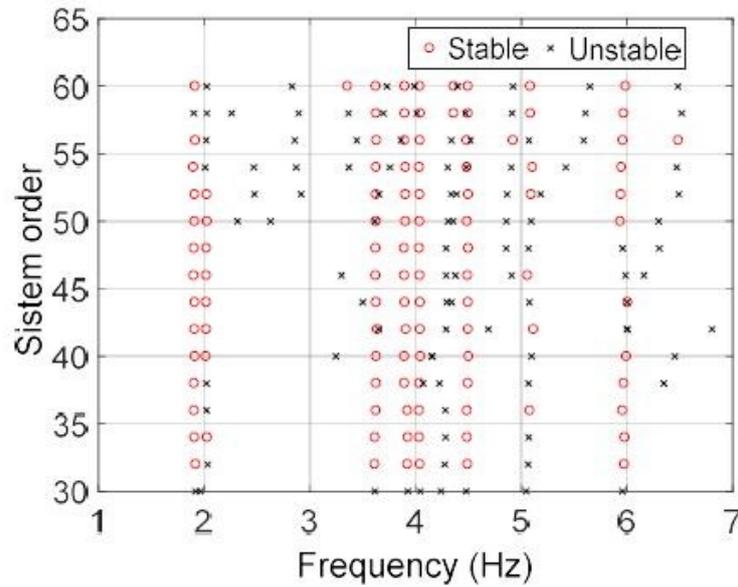


Figura 41 Diagramma di stabilizzazione (frequenza/ordine del sistema)

Fondamentale è quindi per la distinzione tra modi spuri e modi reali e la consistenza dei parametri modali; la consistenza dei modi è definita in termini di distanza in frequenza, smorzamento e spostamenti modali tra i modi più vicini identificati per due ordini del modello consecutivi.

Queste distanze in termini di frequenza $d(f_{i,n}, f_{j,n+\Delta n})$, smorzamento $d(\xi_{i,n}, \xi_{j,n+\Delta n})$, e deformata modale $MAC(\phi_{i,n}, \phi_{j,n+\Delta n})$ sono così definite:

$$d(f_{i,n}, f_{j,n+\Delta n}) = |f_{i,n} - f_{j,n+\Delta n}| \leq 0.025 \text{ Hz},$$

$$d(\xi_{i,n}, \xi_{j,n+\Delta n}) = \frac{|\xi_{i,n} - \xi_{j,n+\Delta n}|}{\max(|\xi_{i,n}|, |\xi_{j,n+\Delta n}|)} \leq 50\%,$$

$$MAC(\phi_{i,n}, \phi_{j,n+\Delta n}) = \frac{|\phi_{i,n}^* \phi_{j,n+\Delta n}|^2}{\|\phi_{i,n}\|_2^2 \|\phi_{j,n+\Delta n}\|_2^2} \geq 0.95.$$

dove $f_{i,n}$, $\xi_{i,n}$ e $\phi_{i,n}$ sono la frequenza, lo smorzamento e il vettore degli spostamenti modali identificati per l'ordine del modello n e $f_{i,n+\Delta n}$, $\xi_{i,n+\Delta n}$ e $\phi_{i,n+\Delta n}$ sono la frequenza, lo smorzamento e il vettore degli spostamenti modali identificati per l'ordine del modello $n + \Delta n$.

4.3.4 Analisi dei cluster

I modi identificati vengono suddivisi in insiemi omogenei definiti cluster, attraverso la tecnica di clustering gerarchico aggregativo. L'implementazione dell'algoritmo per il clustering gerarchico prevede la costruzione di un albero gerarchico definito dendrogramma sulla base di similitudini tra le coppie di cluster e la definizione di un criterio per l'assegnazione degli oggetti ai rami del dendrogramma. Il raggruppamento in cluster segue diversi criteri al variare dell'algoritmo adoperato; in questo caso si è utilizzato il metodo definito Average Linkage, che valuta i modi e forma i cluster sulla base di distanza in frequenza e spostamenti modali, trascurando lo smorzamento.

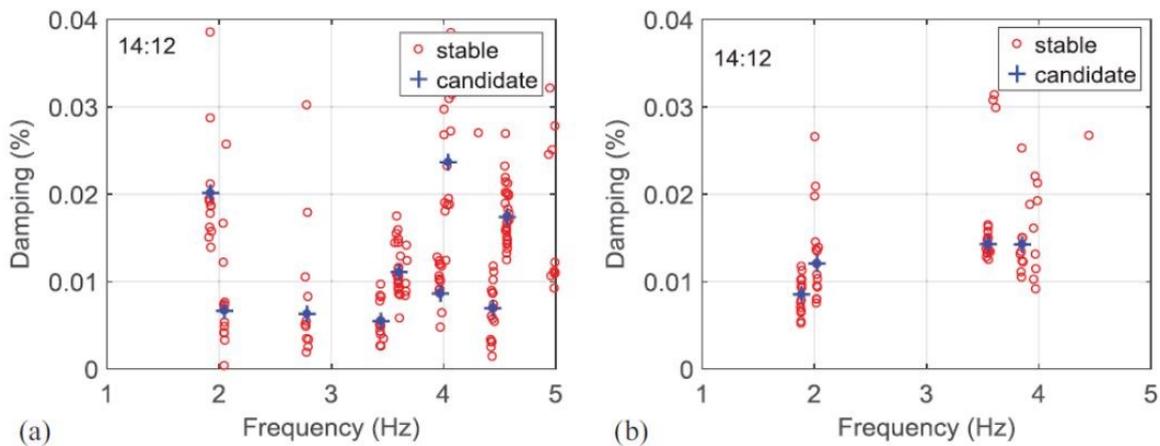


Figura 42 Diagramma di clustering (frequenza/smorzamento) di 2 giorni consecutivi

Due cluster sono raggruppati insieme se

$$d_{i-j} = |f_i - f_j| + (1 - MAC_{i,j}) < 0.1$$

dove f_i e f_j sono le frequenze dei modi i -esimo e j -esimo e $MAC_{i,j}$ è il modal assurance criterion tra questi. Per distinguere i modi molto vicini tra di loro si sono considerate anche le seguenti condizioni

$$|f_i - f_j| \leq 0.05 \quad \text{e} \quad 1 - MAC(\Phi_i; \Phi_i) \leq 0.05.$$

I cluster con un maggior numero di elementi sono associati ai modi reali, mentre quelli con pochi elementi sono associati a modi spuri. Definito n^* come il numero di ordini investigati, un cluster è considerato corrispondente ad un modo fisico se contiene almeno $n^*/3$ elementi.

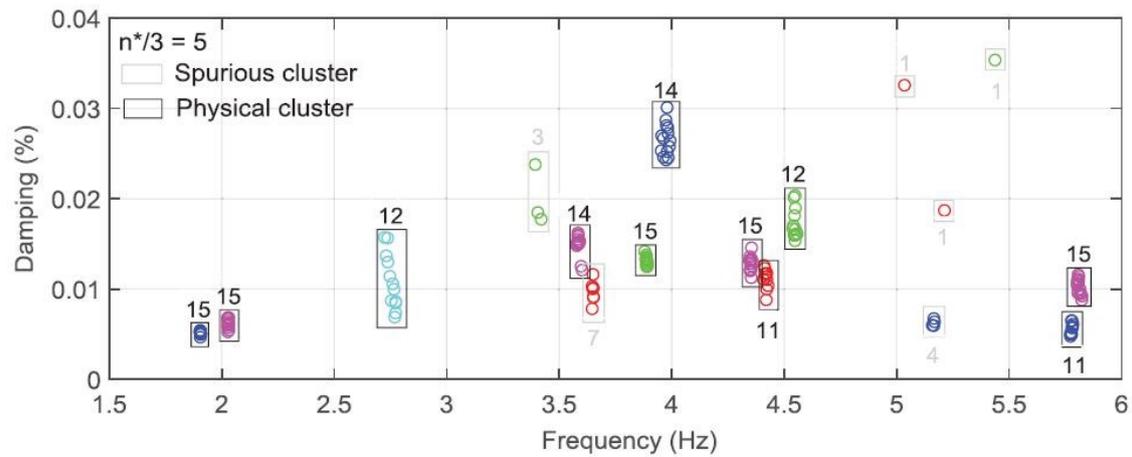


Figura 43 Classificazione sulla base del numero di elementi di ogni cluster

4.3.5 Definizione parametri modali

Si definiscono infine i parametri modali di ogni singolo modo fisico in termini di valore medio pesato tra quelli degli elementi del cluster corrispondente.

Il peso dell' i -esimo elemento del cluster è definito come

$$w_i = \sum_{k=1}^n \frac{|\{\Psi_i\}^T \{\Psi_k^*\}|^2}{\{\Psi_i\}^T \{\Psi_i^*\} \{\Psi_k\}^T \{\Psi_k^*\}}$$

dove Ψ_i e Ψ_k sono le deformate modali dell' i -esimo e del k -esimo elemento del cluster.

La procedura di identificazione dinamica ha permesso, grazie anche all'utilizzo del modello agli elementi finiti, l'identificazione dei primi modi di vibrare del Santuario di Vicoforte.

	Frequency (Hz)		Type of mode	Identification rate (%)
	f_{\min}	f_{\max}		
Mode I	1,892	1,989	1st bending Y	97,03
Mode II	2,025	2,143	1st bending X	88,81
Mode III	2,733	2,326	1st torsional	54,01
Mode IV	3,318	3,794	2nd bending Y	96,02
Mode V	3,700	4,154	2nd bending X	74,27
Mode VI	3,942	4,824	2nd torsional	56,65
Mode VII	5,063	5,152	1st vertical	26,58

Figura 44 Modi di vibrare del Santuario di Vicoforte

4.4 Procedura di identificazione applicata considerando la terna di base

Il presente lavoro è partito dall'adattamento dello script implementato durante i lavori precedenti [15] al fine di automatizzare la procedura di identificazione delle frequenze principali del Santuario di Vicoforte a partire dai segnali raccolti dal sistema di monitoraggio dinamico. Lo script è stato implementato sul software Matlab®, software utilizzato nella versione "Academic Use" grazie alla licenza fornita a tutti gli studenti dal Politecnico di Torino.

Lo script in questione restituisce e dà la possibilità di salvare i seguenti dati :

- Energia del segnale [Energy] + RMS del segnale [RMS];
- Percentuale ottimale del singolo segnale [PerSign] + Massima Accelerazione misurata [MaxAcc];
- Segnale tagliato per assegnata lunghezza [signalCUT];
- Identificazione SSI [ID];
- Modi identificati + forma modale [clust];
- Modi identificati + forma modale + statistiche [full_id];
- Modi identificati: Cluster finale [ID_RES].

Elabora inoltre e permette di salvare una serie di grafici :

- Segnale acquisito;
- Segnale con rimozione media e trend;
- Segnale tagliato;
- Segnale con rimozione frequenze;
- Power Spectral Density (PSD);
- Diagramma di stabilizzazione: $f/damp.$ (tutte le frequenze);
- Diagramma di stabilizzazione: $f/ord.$ (tutte le frequenze);
- Diagramma di stabilizzazione: $f/ord.$ + PSD;
- Diagramma di stabilizzazione: $f/damp.$ (frequenze stabili);
- Diagramma cluster a barre : numero di frequenze che compongono un cluster (tutte le frequenze);
- Diagramma di stabilizzazione: $f/ord.$ (freq. stabile + outliers);
- Diagramma cluster : $f/damp.$ (tutti i cluster colorati);
- Diagramma cluster : $f/damp.$ (solo cluster "stabili" colorati);
- Diagramma cluster : $f/damp.$ (solo cluster) + diagramma a barre;
- Diagramma cluster : $f/ord.$ + modi identificati dal clustering;
- Diagramma cluster : diagramma di stabilizzazione + cluster.

L'apporto di alcune modifiche dello script, quali l'inversione dei filtri utilizzati e la selezione dell'intervallo di segnale da identificare, ha permesso di limitare i tempi di elaborazione dei risultati. Vediamo ora un esempio dei risultati ottenuti dal processo di identificazione dinamica. Si tratta dei risultati ottenuti a partire dalle accelerazioni registrate alle ore 12:04 del 03/06/2017, prendendo in considerazione solo i canali X e Y, vale a dire gli accelerometri posizionati in modo da registrare le accelerazioni della struttura in direzione x e y. Il processo di identificazione è stato applicato al segmento di segnale di 5 min con il valore di RMS più elevato.

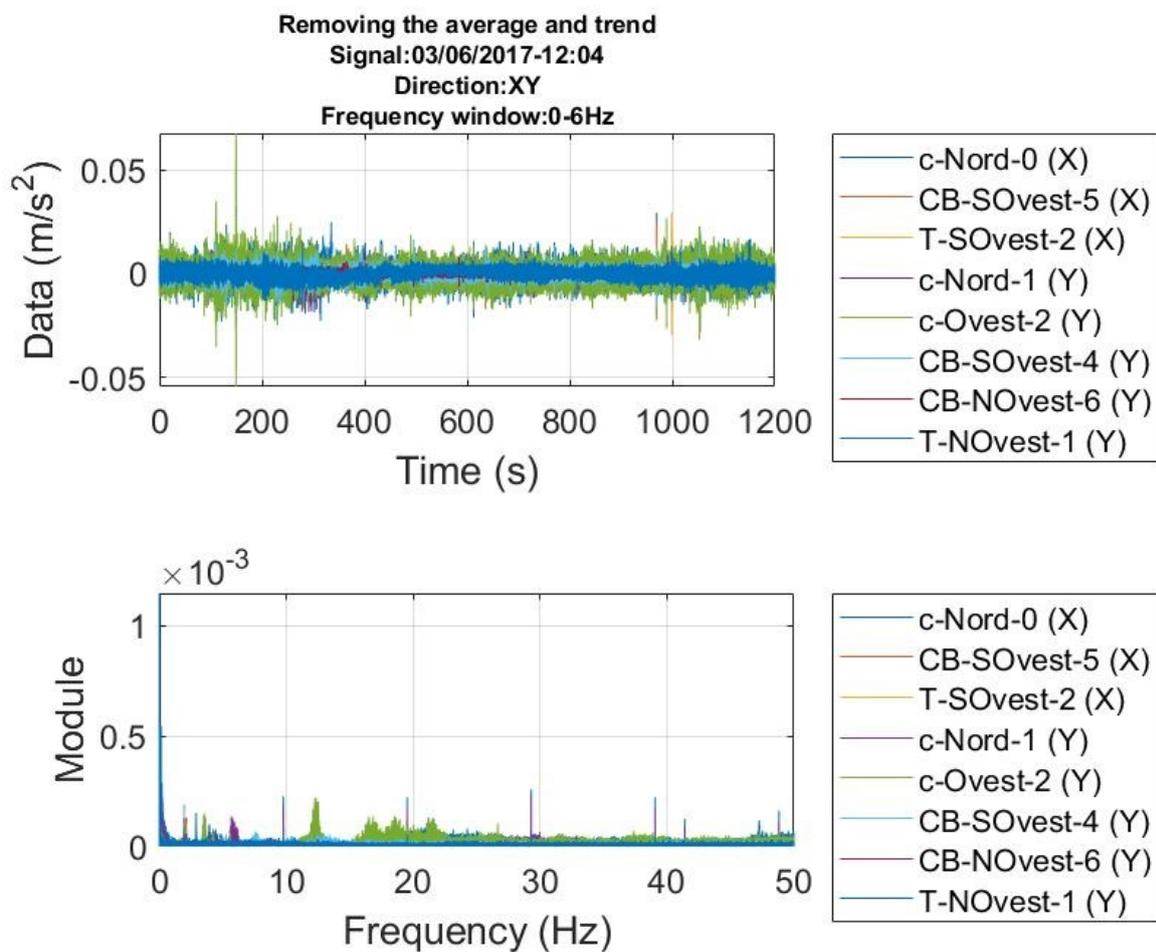


Figura 45 Segnale acquisito con rimozione media e trend

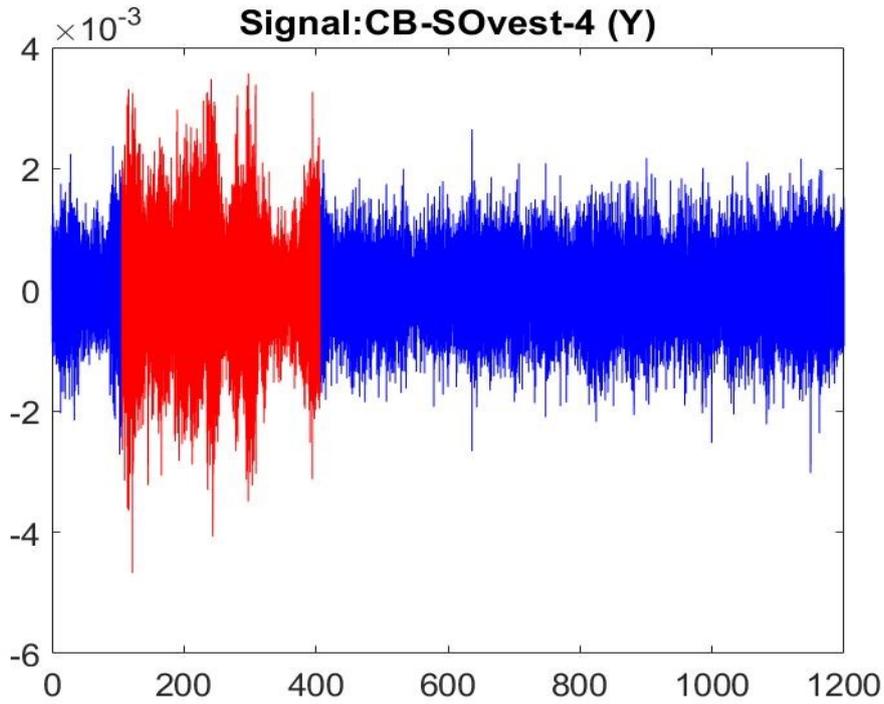


Figura 46 Segnale acquisito dal canale CB-SOvest_4 (Y). In rosso vediamo il segmento di 5 min con valore più elevato di Root Mean Square

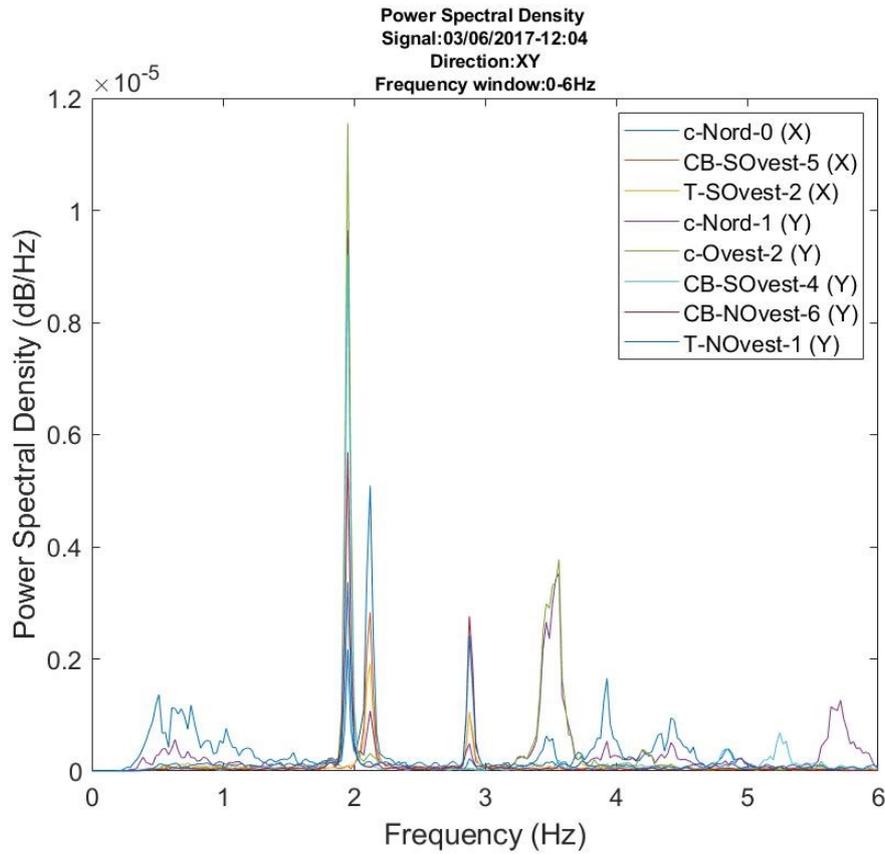


Figura 47 Power Spectral Density (PSD)

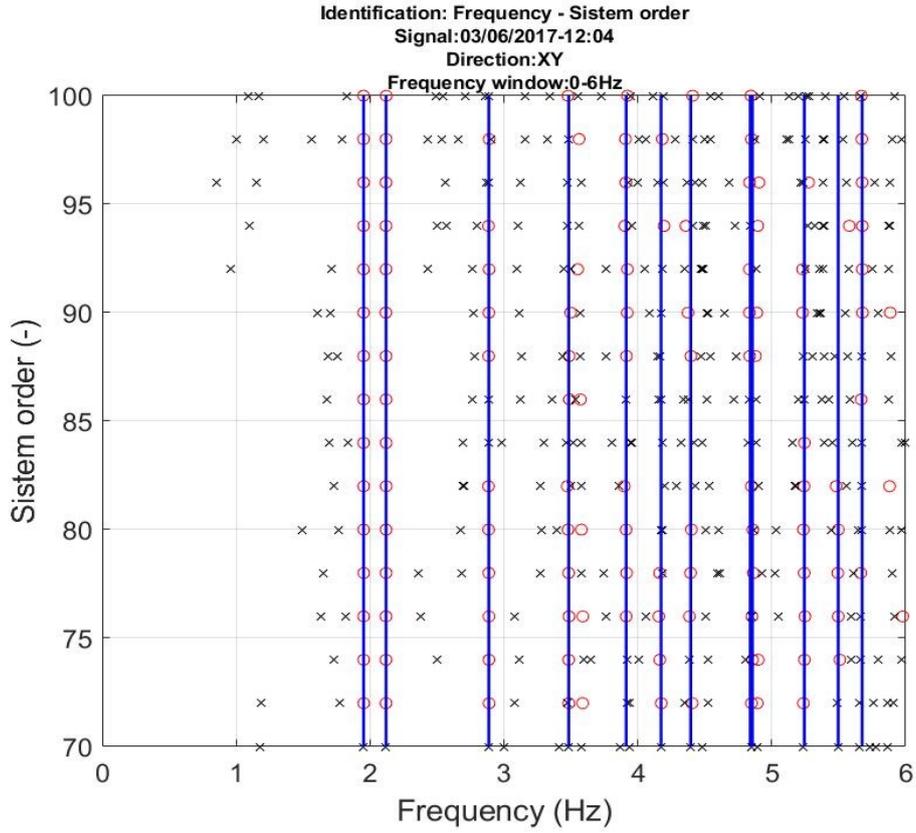


Figura 48 Diagramma di stabilizzazione

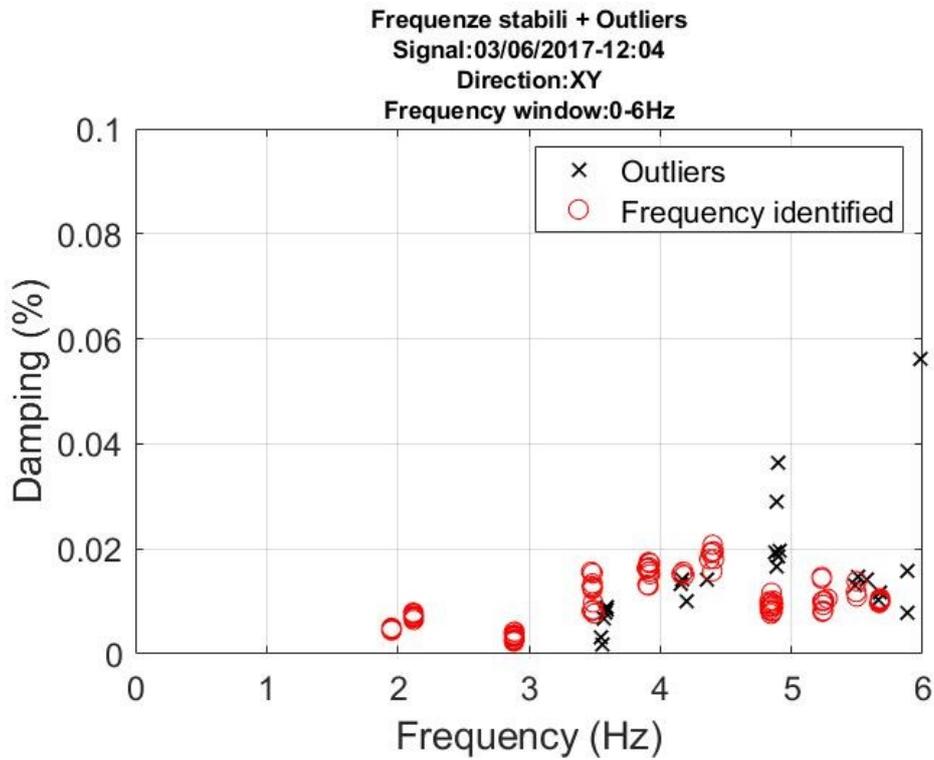


Figura 49 Diagramma di clustering

Lo script elabora i risultati dell'identificazione, tra cui una matrice contenente i modi di vibrare che il processo è riuscito ad identificare, e quindi tutti i parametri modali ad essi corrispondenti, tra i quali frequenza, smorzamento, vettore della deformata modale.

Le identificazioni sono state precedentemente condotte considerando solamente 8 canali su 12, avendo quindi come input le accelerazioni registrate dagli accelerometri posti in direzione X e Y, vale a dire :

- i 2 accelerometri posizionati alla base della cupola a 30 m di altezza (T_Novest_1; T_Sovest_2);
- i 3 accelerometri posizionati sulla cupola a quota 45 m (CB_Sovest_4, CB_Sovest_5, CB_Sovest_6);
- i 3 accelerometri posti ad altezza della lanterna (CB_Ovest_2, C_Nord_0, C_Nord_1).

Sono rimasti invece esclusi :

- i 3 accelerometri ortogonali posti alla base della cripta per registrare le accelerazioni al suono (Sag_1, Sag_2, Sag_3);
- l'accelerometro verticale posizionato alla base della lanterna a 50 m di altezza (CA_Novest_3).

Il presente lavoro di ricerca è partito dal processo di identificazione lineare del Santuario realizzato considerando i segnali raccolti da tutti i canali, vale a dire da tutti i 12 accelerometri che vanno a costituire il sistema di monitoraggio dinamico della struttura, compreso l'accelerometro verticale (Z) posto alla base della lanterna e i 3 accelerometri che vanno a rappresentare la terna di base (X, Y e Z).

Questo processo di identificazione si è reso fondamentale nella prima fase di ricerca, in quanto si è cercato di comprendere se e in che misura il terreno su cui è stata edificata la Basilica influenza i modi di vibrare della struttura, ma anche per avere la gestione dei parametri dinamici e quindi dei dati da analizzare. Tra gli output ottenuti dal processo di identificazione troviamo il vettore delle deformate modali dei modi identificati, un vettore composto da 12 spostamenti modali corrispondenti ai 12 canali di registrazione dei segnali, che sarà utile per definire l'influenza del terreno, come vedremo nei prossimi capitoli.

Si è deciso di utilizzare i segnali registrati alle ore 12:15 circa dal 01/02/2018 al 31/01/2019, in quanto le identificazioni dei segnali registrati nelle ore principali della giornata permettono di identificare un numero maggiore di modi della struttura considerati reali. In seguito si utilizzeranno le identificazioni di 7 ore al giorno per il periodo che va dal 01/12/2016 al 31/01/2019 per avere un numero maggiore di dati a disposizione, come vedremo in seguito.

Si è inoltre stabilito di utilizzare 10 minuti del segnale registrati, lungo 20 minuti, in quanto permette un'analisi più performante al prezzo di un piccolo incremento di onere computazionale.

Non tutte le identificazioni permettono di identificare quelle che sono considerate le prime due frequenze del Santuario di Vicoforte, che rappresentano rispettivamente il primo modo di vibrare della struttura in direzione Y e il primo modo di vibrare in direzione X. Nelle figure 54-55-56 possiamo vedere i dati di frequenza ottenuti dalle identificazioni organizzati in modo da selezionare le prime frequenze reali della struttura.

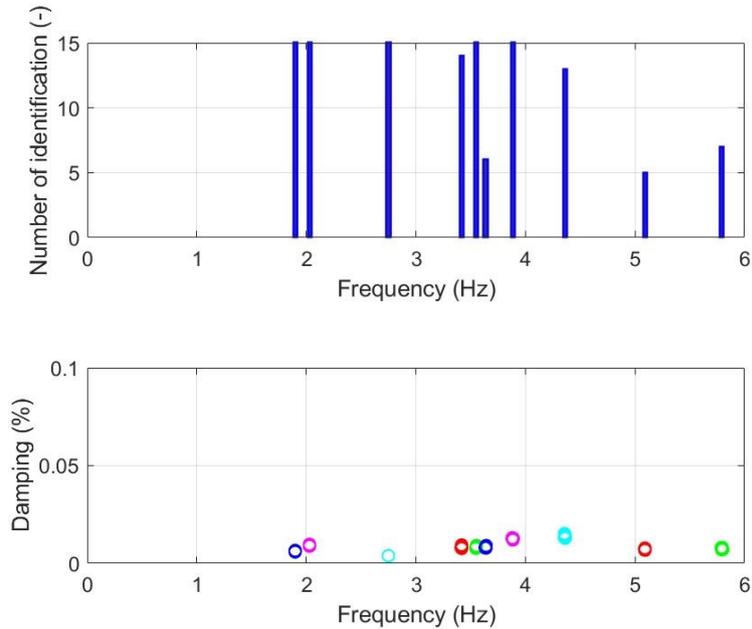


Figura 50 Diagramma di stabilizzazione e cluster ottenuti da identificazione XYZCR delle ore 12:10 del 19/01/2019

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.3715	0.0612	0.0423	0.7683	0.8948	1	0.9543	0.7421	0.0174	0.0088	0.0134	-0.0396
2	0.9782	1	0.9836	-0.2683	-0.1578	-0.0348	-0.0177	0.0328	0.0732	0.0568	-0.0473	0.0253
3	0.0963	-0.6270	-0.7226	0.2016	-0.0023	0.0679	0.9868	1	0.0363	0.0226	0.0621	-0.1030
4	0.7244	-0.0556	-0.0216	0.7519	1	-0.1969	0.1029	-0.1362	-0.4210	-0.0470	-0.0720	0.2035
5	0.2670	-0.0307	0.0323	0.8595	1	0.1872	-0.0880	-0.1476	0.1433	0.0250	0.0320	0.0750
6	0.7653	0.2662	-1	-0.4172	-0.3267	0.0752	-0.3002	-0.7867	0.1864	-0.0843	0.3742	0.0775
7	1	0.2484	0.1881	-0.2577	-0.0724	0.0083	-0.0557	0.0801	0.4008	-0.0147	0.1494	3.7945e-04
8	1	-0.2473	-0.2600	-0.4680	-0.2462	0.0434	0.0881	0.0570	0.4481	-0.0076	-0.1548	0.0290
9	0.1444	0.1758	0.2632	-0.1547	-0.0677	0.8139	-0.2419	-0.2657	1	-0.0604	-0.1306	0.1267
10	0.0787	0.0279	0.1530	1	-0.0647	0.0331	-0.0063	-0.0343	0.0731	-0.0101	-0.0186	-0.0462
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

Figura 51 Vettore di deformazione modale output dell' identificazione XYZCR delle ore 12:10 del 19/01/2019

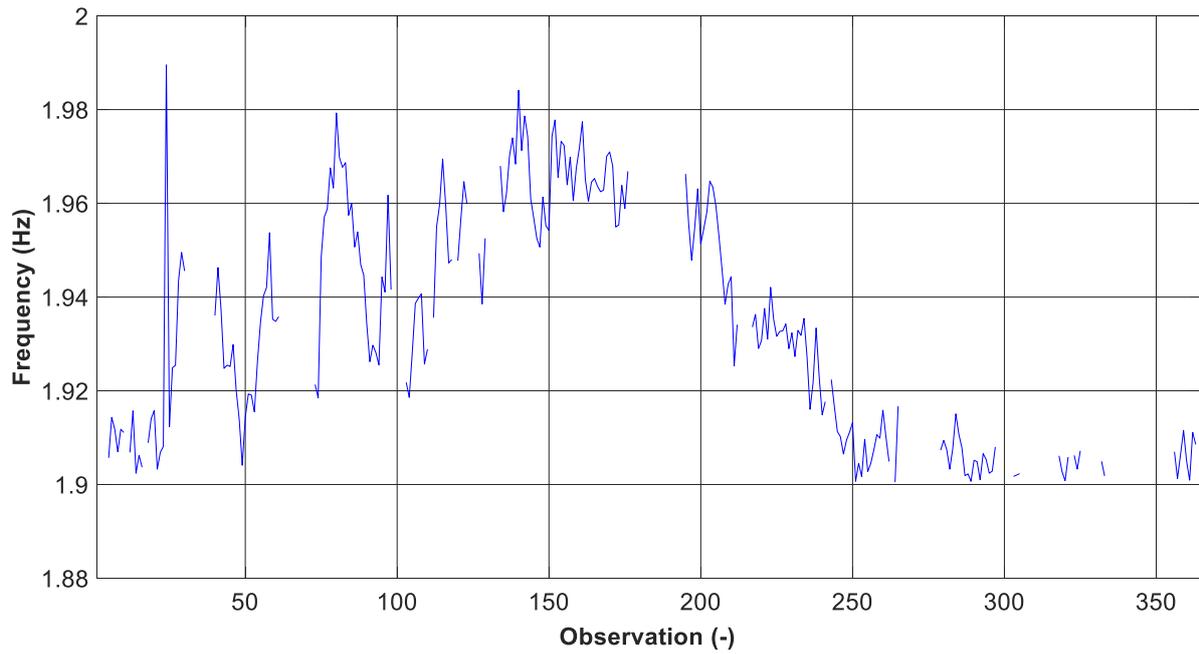


Figura 52 Prima frequenza identificata - primo modo dir. Y (range 1.892-1.989 Hz)

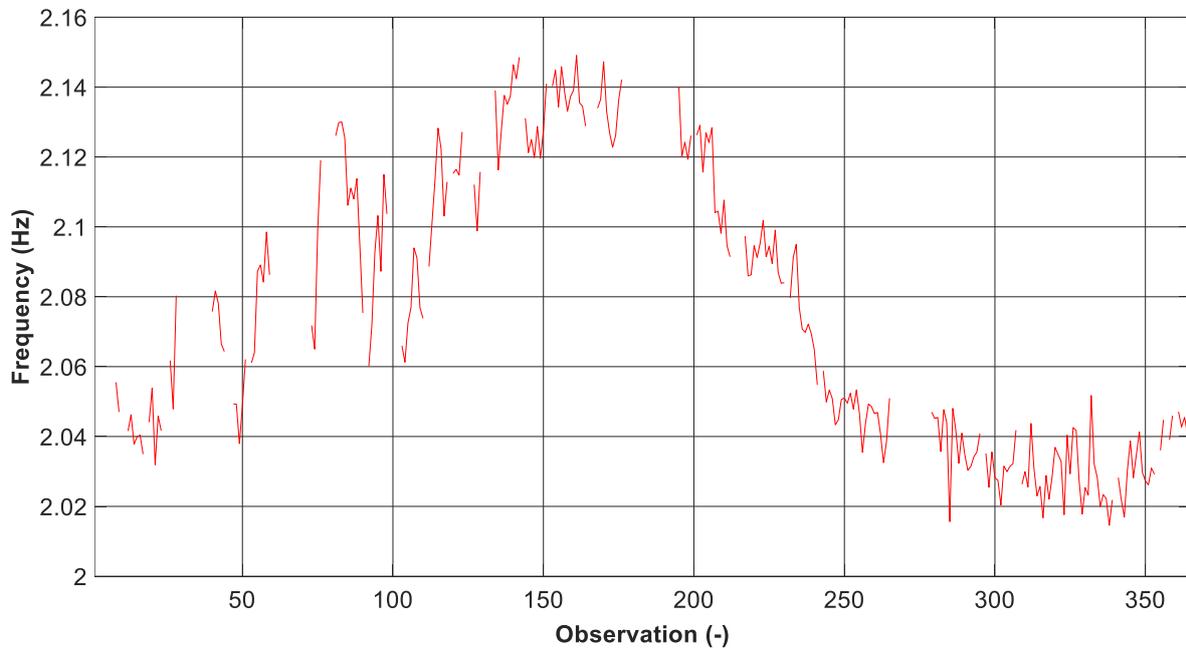


Figura 53 Seconda frequenza identificata - primo modo dir. X (range 2.025-2.143 Hz)

5. Influenza agenti esterni

5.1 Dati ambientali ARPA Piemonte

Studi precedenti su vari tipi di strutture hanno portato a ritenere che gli agenti atmosferici abbiano una certa influenza sia sui parametri dinamici che sui quelli statici, ottenuti nel nostro caso dai sistemi di monitoraggio permanenti posti nel Santuario di Vicoforte.

Si è partiti dall'analisi dei dati ambientali, recuperati dal sito di ARPA Piemonte <http://www.arpa.piemonte.it/dati-1>, il quale fornisce i dati giornalieri registrati presso la stazione di Mondovì, a pochi chilometri dal Santuario di Vicoforte. Grazie all'applicazione "meteo" scaricabile dal sito dell'Arpa, è stato possibile avere a disposizione i dati dal 01/01/2004 fino ad oggi.

Sono stati presi in considerazione i dati di:

- temperatura esterna giornaliera (massima, media e minima),
- altezza di precipitazione,
- altezza di neve accumulata,
- percentuale di umidità,
- velocità del vento.

Questi dati sono stati raccolti, organizzati ed elaborati affinché potessero prestarsi ad analisi statistiche di regressione e correlazione.

Data	Precipitazione dalle 0 alle ...	Precipitazione dalle 0 alle ...	Temperatura media (°C)	Temperatura massima (°C)	Temperatura minima (°C)	Umidità' media (%)	Umidità' massima (%)	Umidità' minima (%)
01/01/2019	0,0	0,0	3,2	7,8	-2,9	86	96	62
02/01/2019	0,0	0,0	2,1	12,5	-3,1	81	95	23
03/01/2019	0,0	0,0	0,7	10,6	-5,0	51	77	13
04/01/2019	0,0	0,0	-0,1	7,5	-5,5	59	79	25
05/01/2019	0,0	0,0	3,6	11,0	-4,0	71	86	36
06/01/2019	0,0	0,0	4,6	15,1	-1,6	60	81	29
07/01/2019	0,0	0,0	3,1	12,3	-2,7	62	88	27
08/01/2019	0,0	0,0	-0,3	6,4	-3,2	84	97	53
09/01/2019	0,0	0,0	0,6	8,7	-3,6	64	91	29
10/01/2019	0,0	0,0	0,3	9,4	-4,7	67	71	15
11/01/2019	0,0	0,0	-0,8	6,7	-7,0	52	77	20
12/01/2019	0,0	0,0	2,2	13,9	-3,9	60	84	25
13/01/2019	0,0	0,0	4,3	14,6	-1,4	66	84	33
14/01/2019	0,0	0,0	7,1	16,1	0,3	49	83	24
15/01/2019	0,0	0,0	2,7	12,3	-2,8	56	81	24
16/01/2019	0,0	0,0	3,6	9,3	-3,4	64	86	34
17/01/2019	0,0	0,0	3,7	9,3	-3,7	75	94	45
18/01/2019	0,0	0,0	3,8	9,5	-3,7	66	99	24
19/01/2019	0,0	0,0	1,6	2,6	-0,9	90	99	62
20/01/2019	0,0	0,0	-0,6	5,8	-4,0	88	99	57
21/01/2019	0,0	0,0	-1,1	5,6	-5,9	80	99	50
22/01/2019	0,0	0,0	-1,6	4,8	-6,2	73	89	46
23/01/2019	0,0	0,0	-2,0	1,3	-5,9	90	99	72
24/01/2019	13,4	7,6	-0,4	6,3	-6,2	89	99	59
25/01/2019	0,0	5,8	-2,8	7,9	-9,9	70	99	33
26/01/2019	0,0	0,0	-0,2	10,4	-6,0	63	88	27
27/01/2019	0,0	0,0	0,9	6,5	-5,9	75	95	44
28/01/2019	0,0	0,0	0,2	10,9	-6,8	54	99	13
29/01/2019	0,0	0,0	-0,7	6,3	-7,3	52	71	20
30/01/2019	0,0	0,0	-1,0	5,2	-8,3	75	55	55
31/01/2019	0,0	0,0	-2,8	3,5	-7,8	80	92	46
01/02/2019	3,8	0,0	-0,1	10,6	-2,8	87	99	86
02/02/2019	20,8	24,6	-0,5	2,8	-6,6	98	99	89
03/02/2019	0,0	0,0	0,2	9,7	6,7	88	99	53
04/02/2019	0,0	0,0	2,9	8,8	-3,2	65	87	37
05/02/2019	0,0	0,0	0,1	8,4	-5,5	71	91	34
06/02/2019	0,0	0,0	0,6	9,8	-5,8	65	86	32
07/02/2019	0,0	0,0	0,8	8,6	-6,3	63	84	31
08/02/2019	0,0	0,0	0,1	12,5	-4,9	64	85	28
09/02/2019	0,0	0,0	2,3	10,6	-3,6	64	84	31
10/02/2019	0,0	0,0	2,9	9,8	-1,0	72	91	44
11/02/2019	0,0	0,0	4,1	11,3	-3,4	45	87	19
12/02/2019	0,0	0,0	2,7	12,8	-5,3	51	70	17

Figura 54 Applicazione "meteo" scaricabile dal sito di ARPA Piemonte

Il trattamento e l'analisi dei dati raccolti da ARPA Piemonte ha permesso di ottenere i trend dei parametri presi in considerazione, come possiamo vedere nelle immagini seguenti.

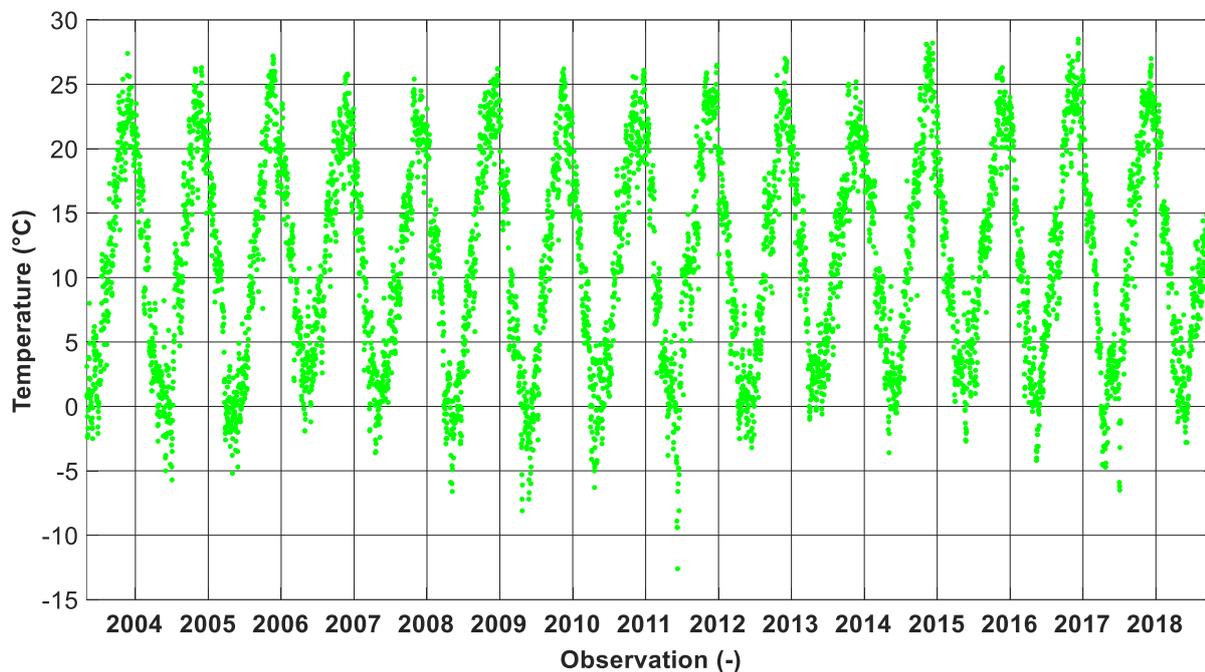


Figura 55 Temperatura media giornaliera ambientale – Osservazioni 2004-2018

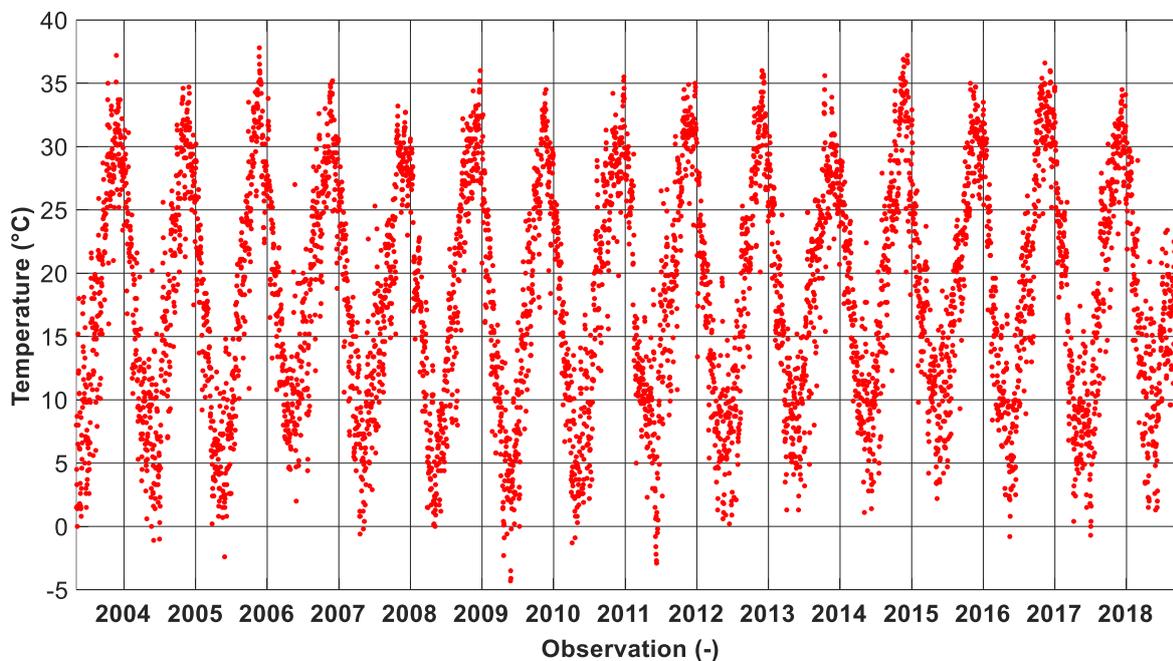


Figura 56 Temperatura massima giornaliera ambientale – Osservazioni 2004-2018

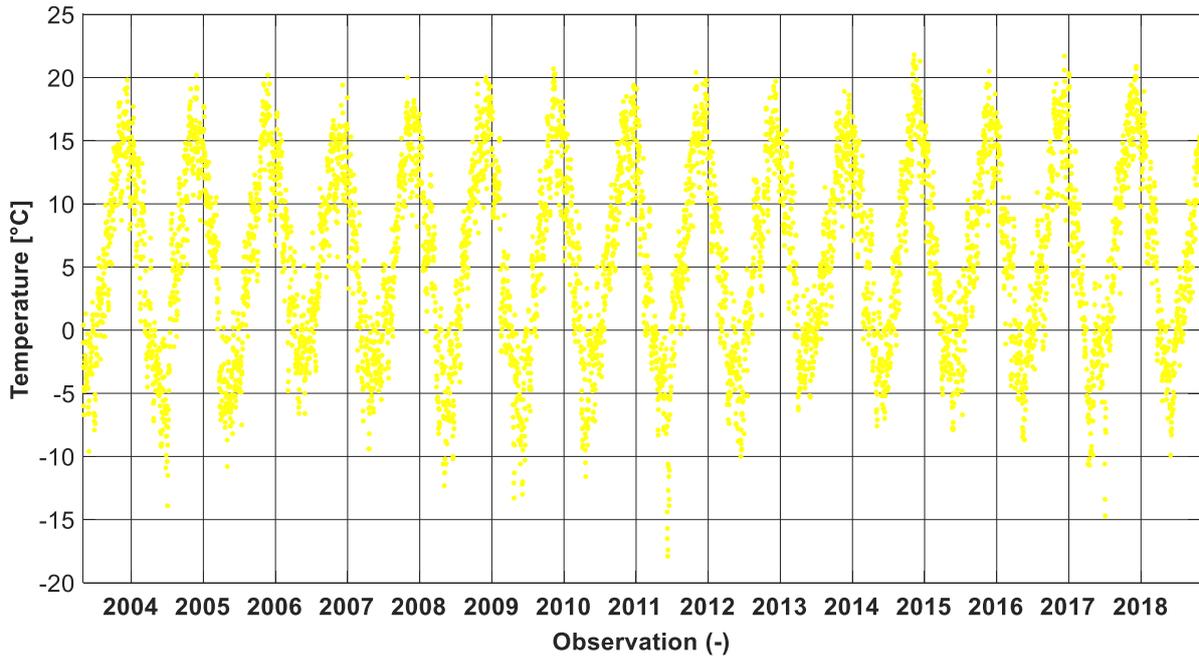


Figura 57 Temperatura minima giornaliera ambientale – Osservazioni 2004-2018

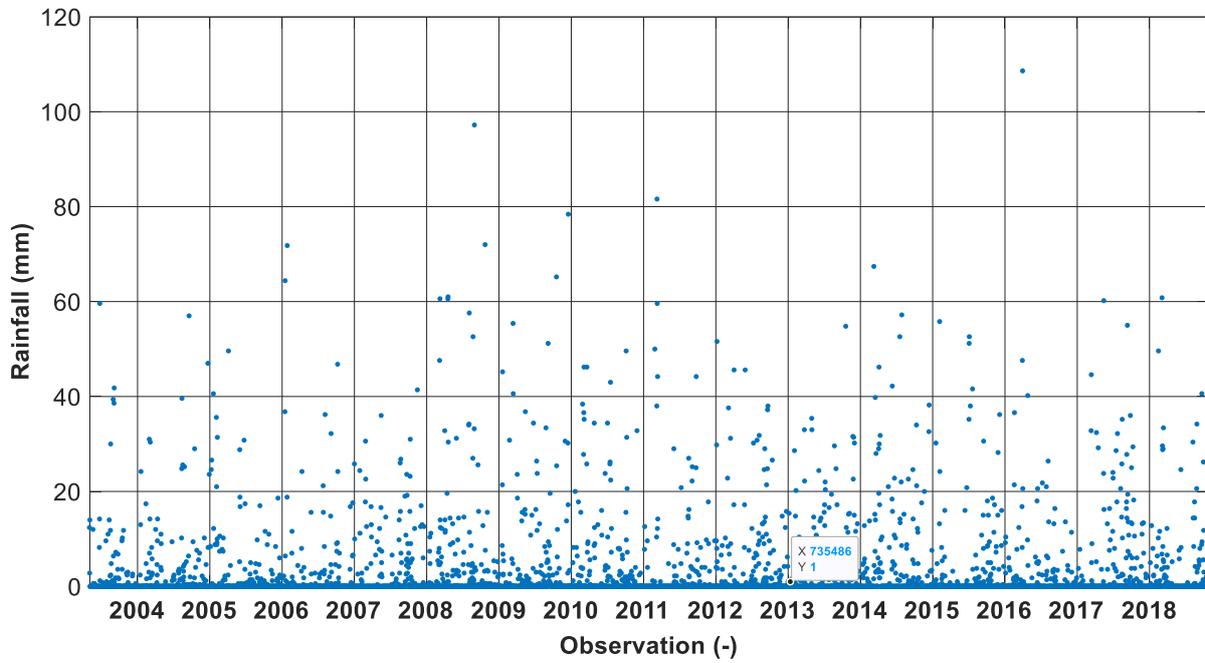


Figura 58 Altezza di pioggia giornaliera – Osservazioni 2004-2018

5. Influenza agenti esterni

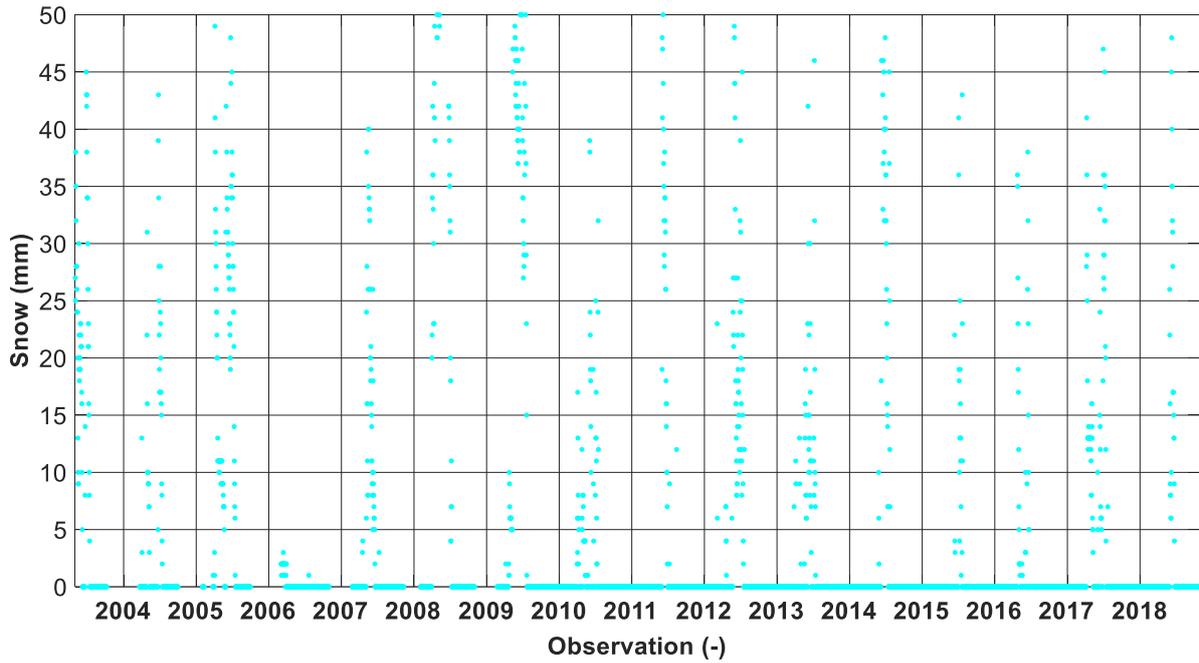


Figura 59 Neve accumulata giornaliera – Osservazioni 2004-2018

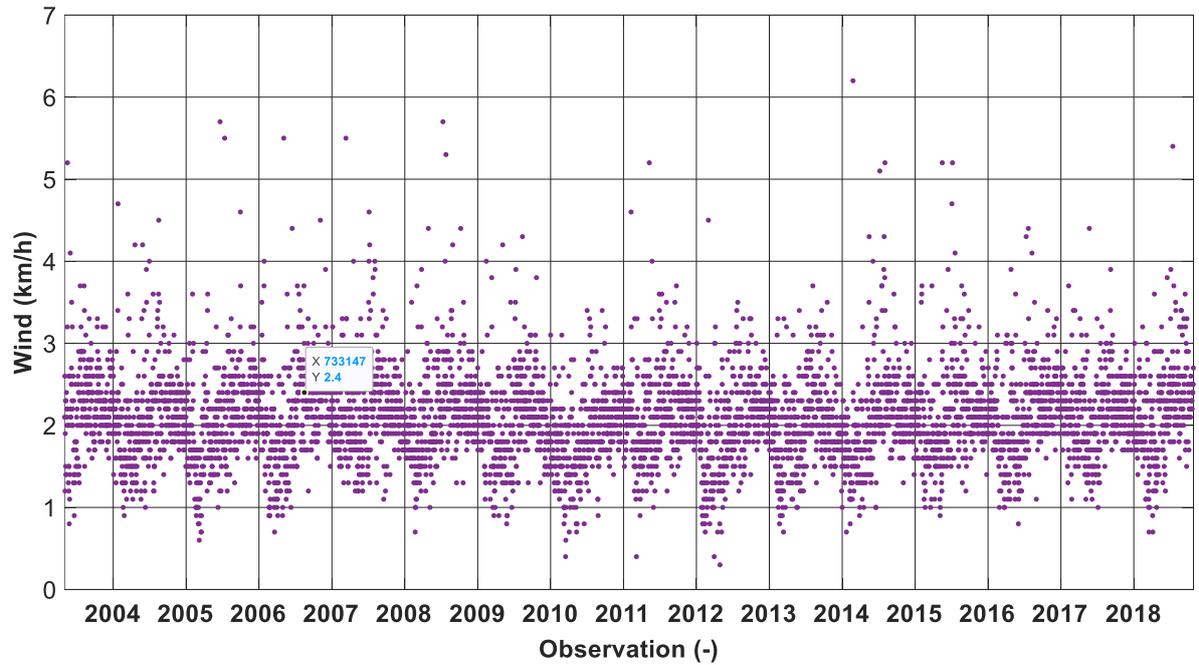


Figura 60 Velocità del vento giornaliera- Osservazioni 2004-2018

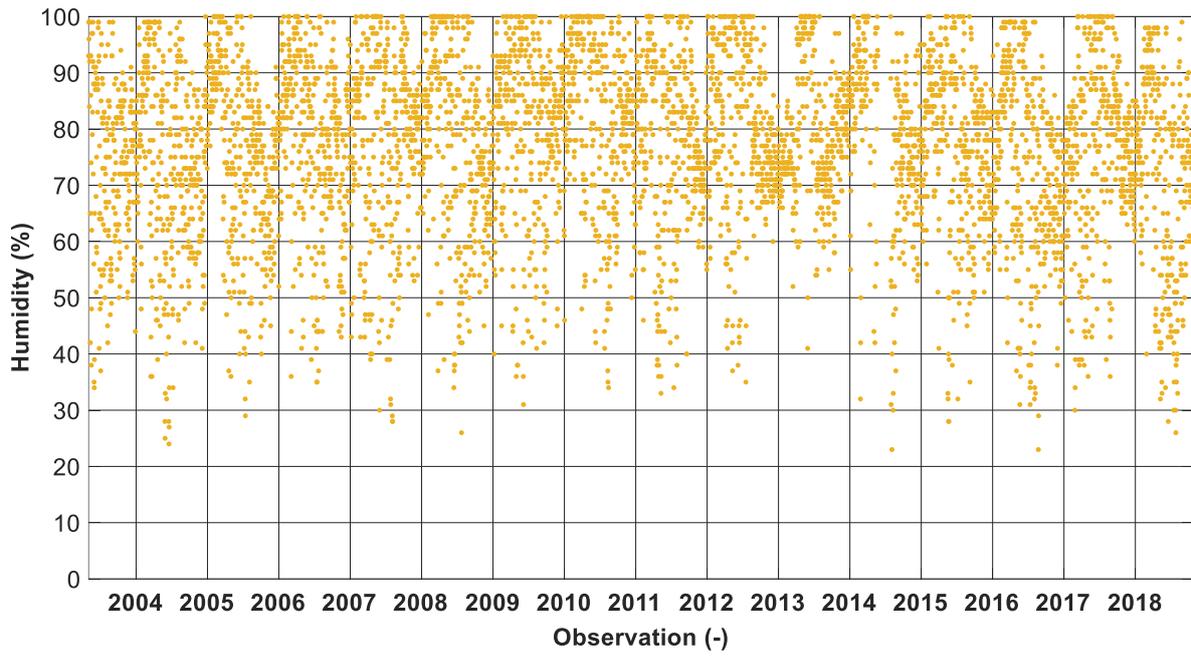


Figura 61 Percentuale di umidità giornaliera _ Osservazioni 2004-2018

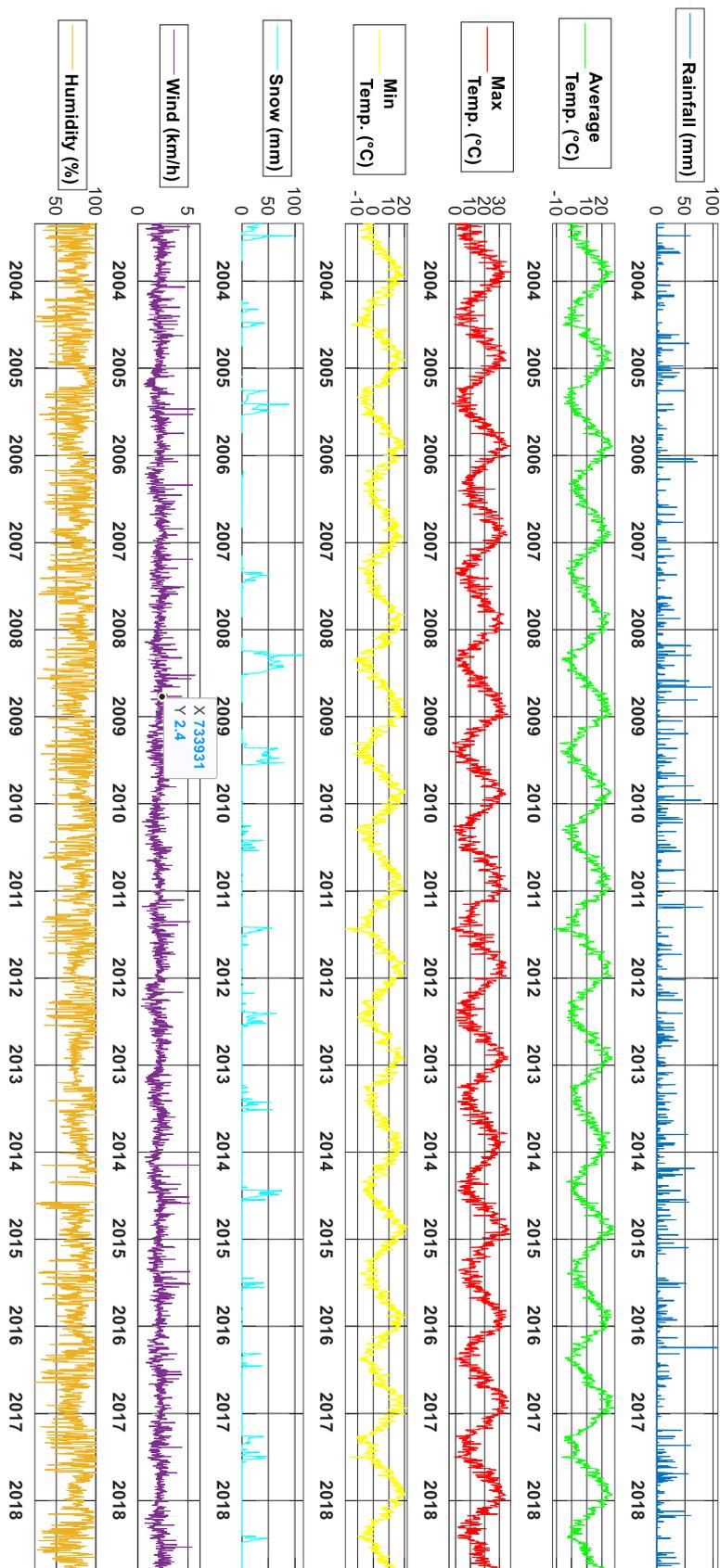


Figura 62 Plot dati ambientali ARPA osservazioni 2004-2018

5.2 Dati sperimentali dei sistemi di monitoraggio statico e dinamico

Una delle principali difficoltà incontrate è legata alla reperibilità dei dati da analizzare. Il sistema di monitoraggio statico ha registrato i dati raccolti dai sensori dal 2004, anno in cui è stato installato, fino al 2015, per poi interrompersi. Al contrario il sistema di monitoraggio dinamico ha iniziato a registrare i segnali acquisiti dagli accelerometri soltanto a partire dal 2016; questo vuol dire che non abbiamo a disposizione dati statici e dinamici relativi allo stesso periodo che ci avrebbero permesso di valutare la possibilità che esista un qualche tipo di correlazione tra questi.

A partire dai risultati ottenuti dalle identificazioni realizzate considerando tutti i 12 canali del sistema di monitoraggio dinamico, imponendo il range già definito per individuare prima e seconda frequenza, appare visibile una fluttuazione delle frequenze nel corso dell' anno.

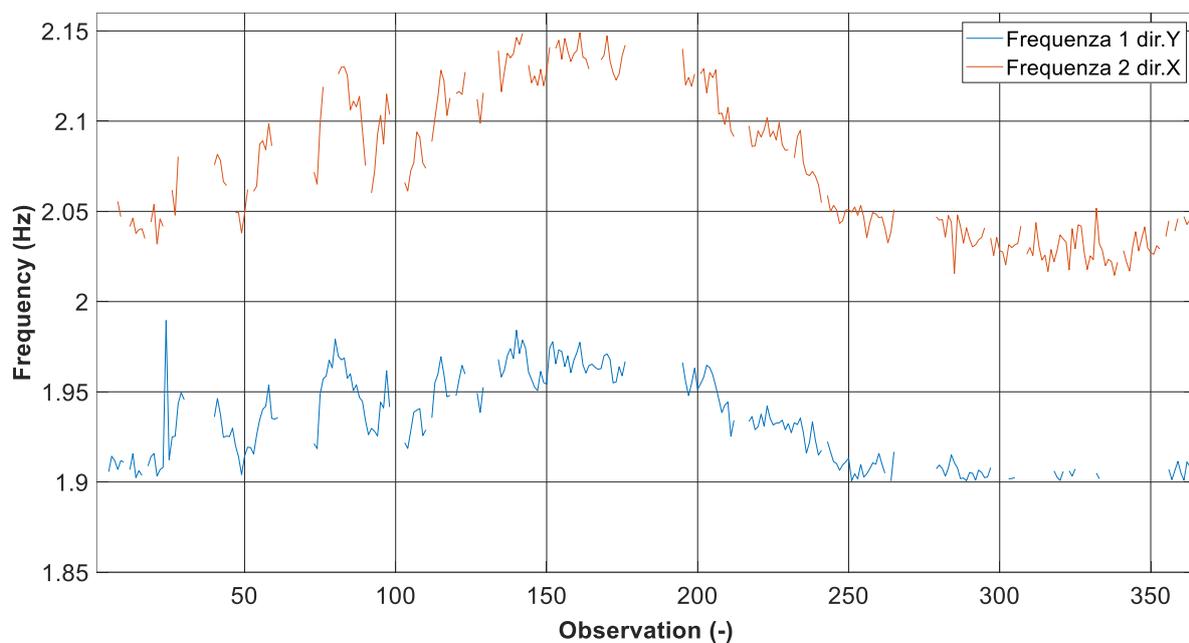


Figura 63 Primi 2 modi di vibrare del Santuario di Vicoforte

I dati del sistema di monitoraggio statico analizzati sono tutti quelli che è stato possibile recuperare dal sito della società Gdtest che aveva in gestione il sistema di monitoraggio e la raccolta dati. I dati presenti sul sito corrispondono ai parametri registrati dai sensori del sistema di monitoraggio statico nel lasso di tempo che va dal 2004 al 2014. Appare evidente come il trattamento di questi dati sia molto complicato a causa dell'interruzione del sistema di monitoraggio per lunghi periodi o di dati che sembrano essere degli outlier e che fanno pensare ad un cattivo funzionamento dei sensori.

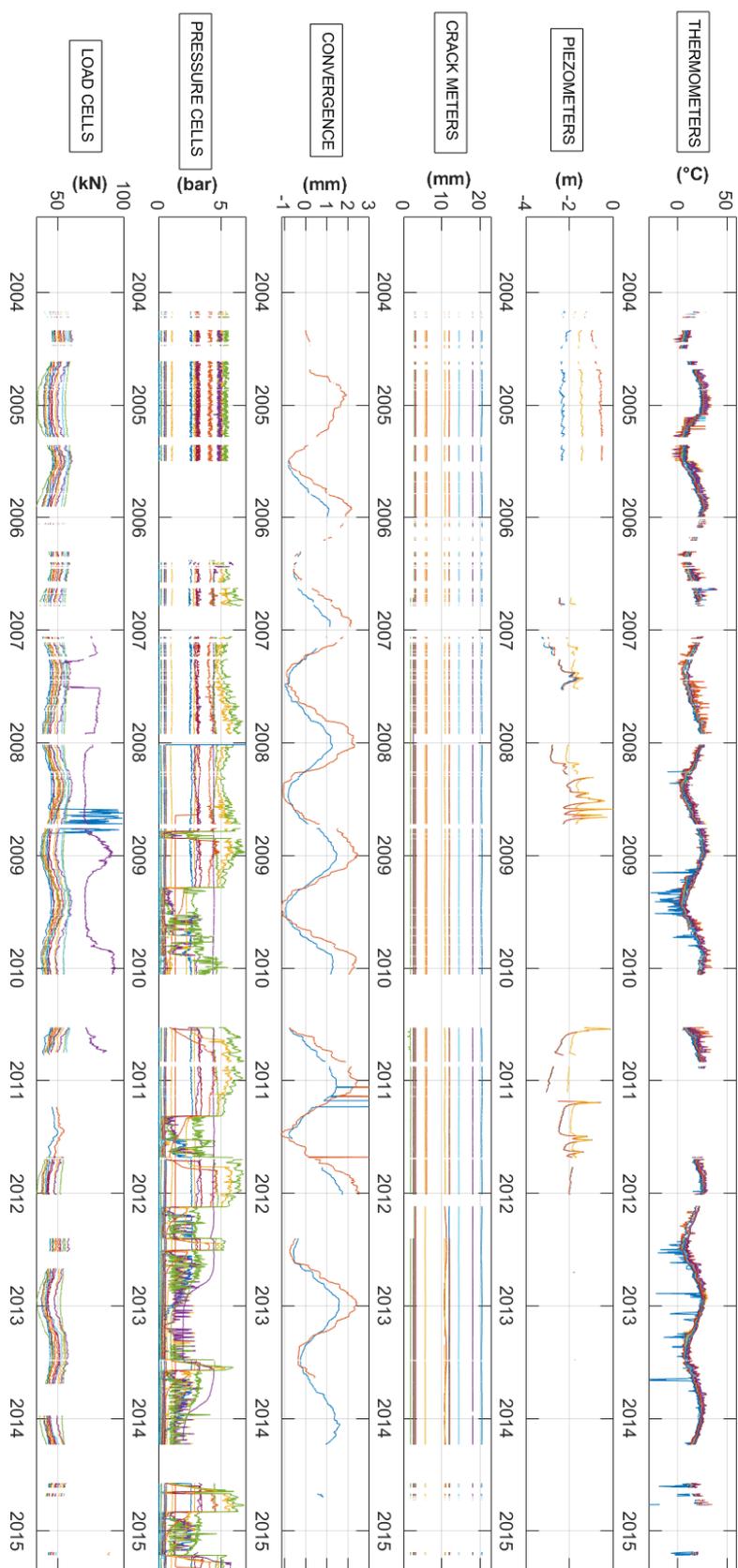


Figura 64 Plot di tutti i dati registrati dal sistema di monitoraggio statico

Vediamo ora un set di dati per tipologia di sensori. Non si tratta di dati scelti a caso, come vedremo dopo, ma il risultato dell'applicazione di particolari tecniche di analisi statistica.

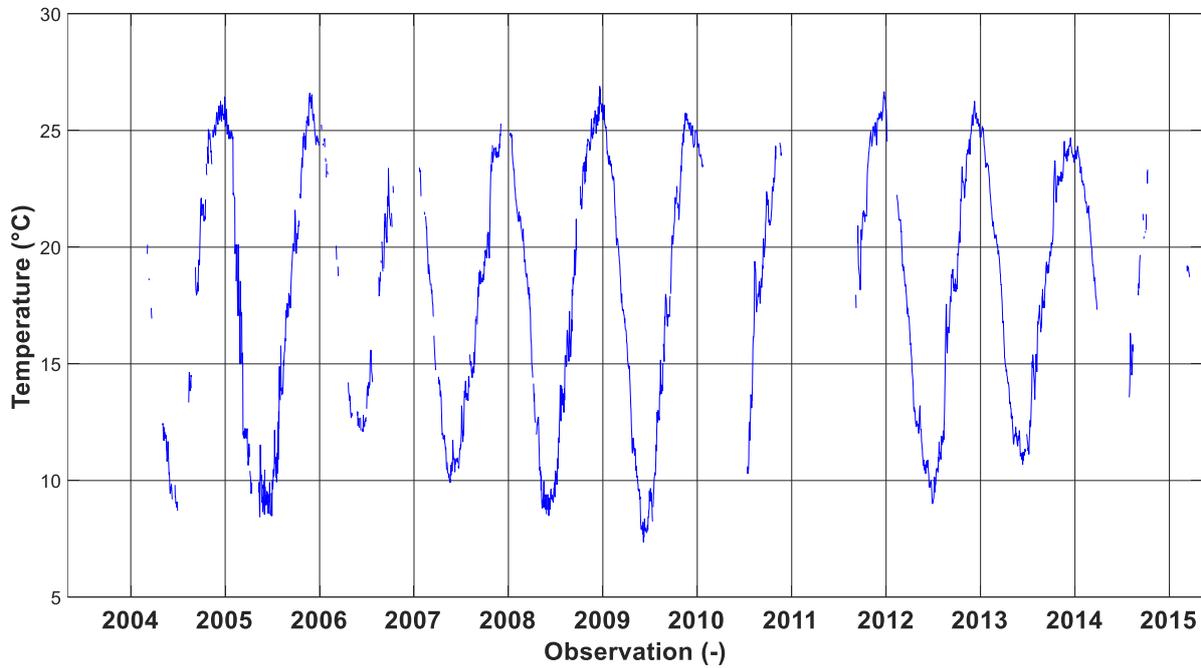


Figura 65 Trend dati temperatura acquisiti dal termometro n°7 posto sull'ellisse interno in corrispondenza del tamburo a quota +32 m

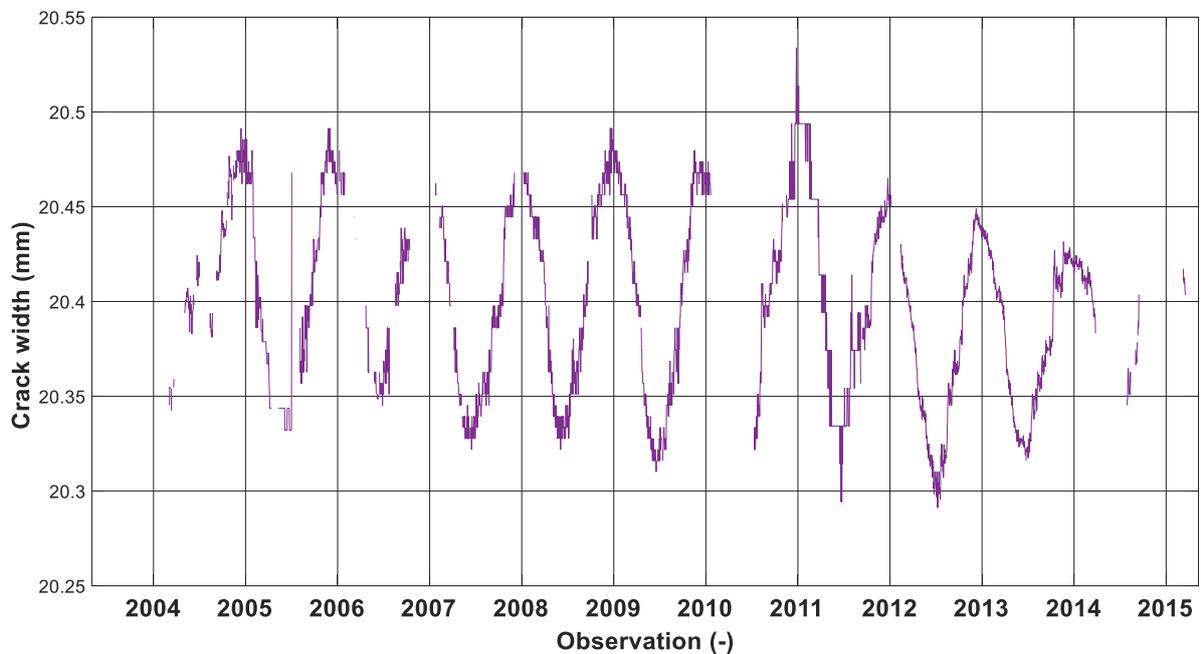


Figura 66 Trend dati ampiezza fessura acquisiti dal fessurimetro n°8 posto sulla lato ovest della cupola

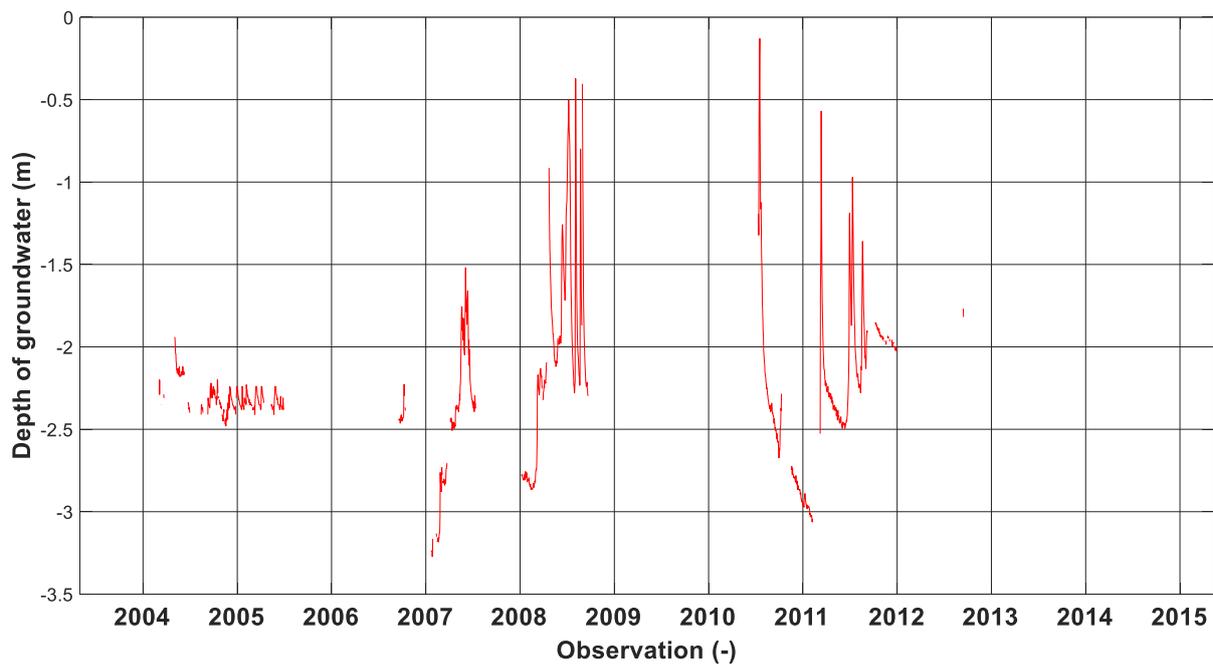


Figura 67 Trend dati profondità di falda acquisiti dal piezometro n°1

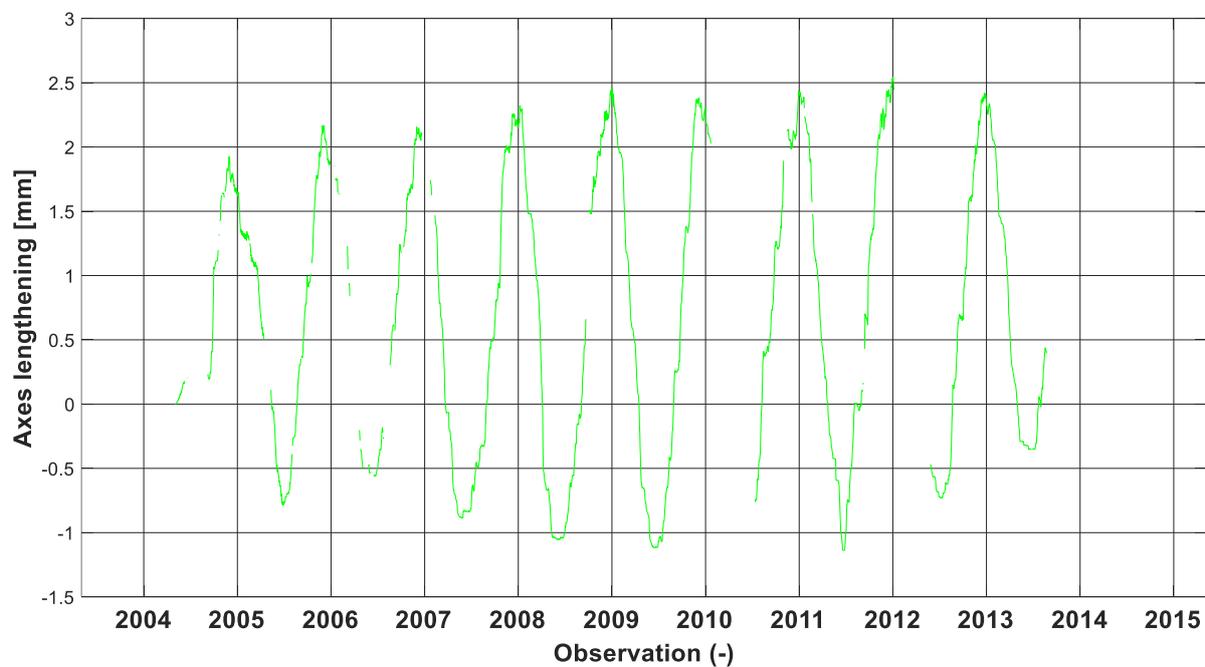


Figura 68 Trend dati convergenza asse minore della cupola

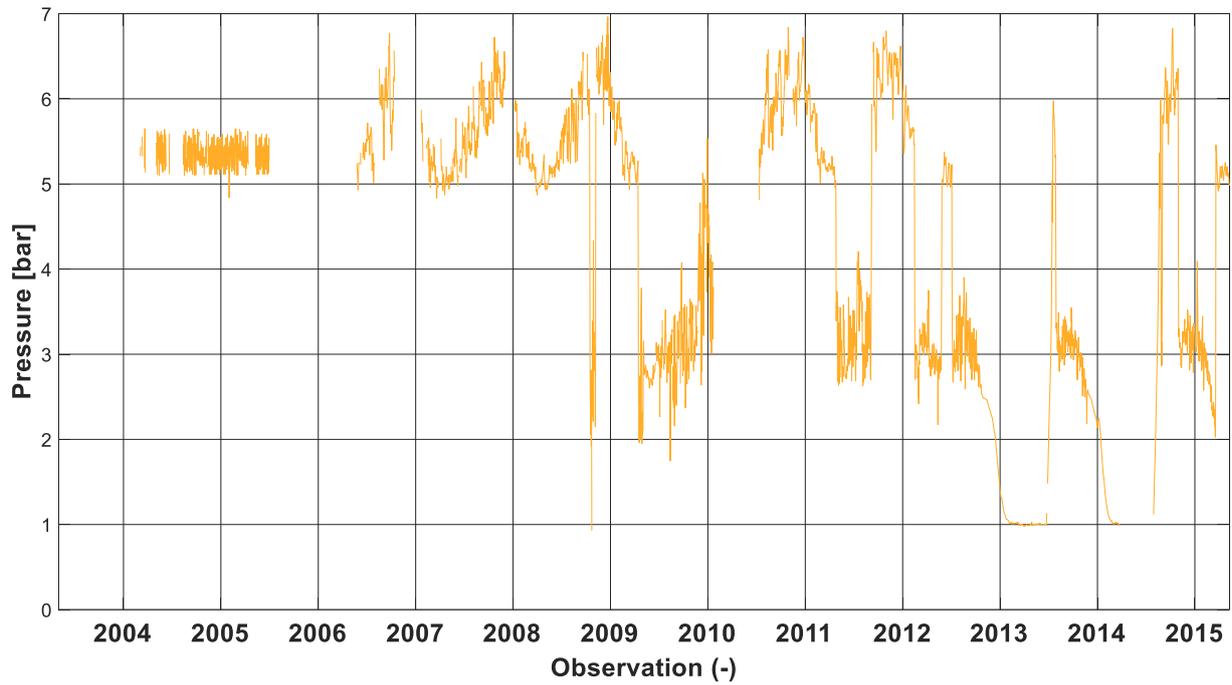


Figura 69 Trend dati acquisiti dalla cella di pressione n°12 posta all'estradosso della cupola a quota +50 m

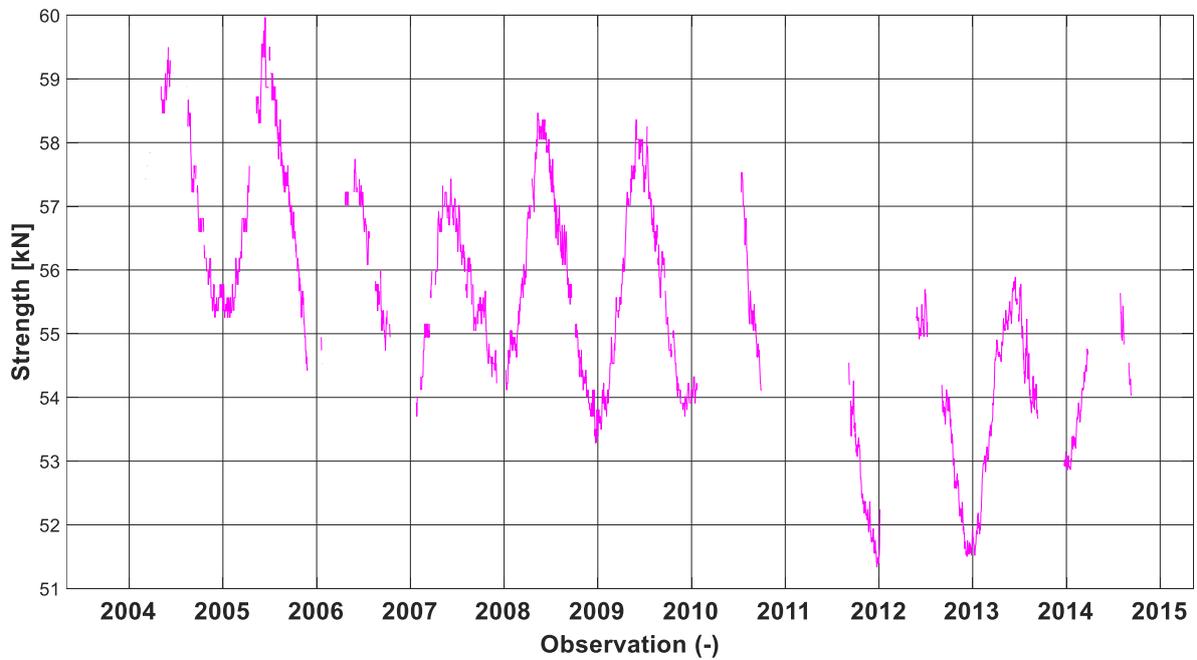


Figura 70 Trend dati acquisiti dalla cella di carico n°20 posta in direzione nord-ovest

5.3 Correlazioni tra i dati a disposizione

Dopo aver organizzato ed ordinato i dati che si hanno a disposizione, provenienti dal sistema di monitoraggio statico, dal sistema di monitoraggio dinamico e dagli archivi di ARPA Piemonte, si è passati alla loro analisi statistica.

Vista la grande quantità di dati provenienti dal sistema di monitoraggio statico, nonostante questi presentassero numerosi buchi temporali, è stato necessario selezionare i set che hanno maggiore rilevanza.

5.3.1 Principal Componente Analysis (PCA)

Abbiamo a disposizione diverse tipologie di dati, raccolti dai sensori che costituiscono il sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte, vale a dire le temperature registrate dai termometri, le altezze piezometriche dei piezometri, le ampiezze delle fessure dei fessurimetri, la convergenza degli assi, le pressioni delle celle di pressione e le forze delle celle di carico. Per ogni tipologia di dati è necessario selezionare i set più rilevanti per facilitare il trattamento dei dati, e per farlo ci si è avvalsi della tecnica di Principal Component Analysis (PCA).

La Principal Component Analysis (PCA), anche nota come trasformata di Karhunen-Loève, trasformata di Hotelling o decomposizione ortogonale propria, è una tecnica per la semplificazione dei dati utilizzata nell'ambito della statistica multivariata. Questo metodo fu proposto per la prima volta nel 1901 da Karl Pearson e sviluppato poi da Harold Hotelling nel 1933, e fa parte dell'analisi fattoriale. Lo scopo è quello di ridurre il numero più o meno elevato di variabili che descrivono un insieme di dati ad un numero minore di variabili latenti, limitando il più possibile la perdita di informazioni.

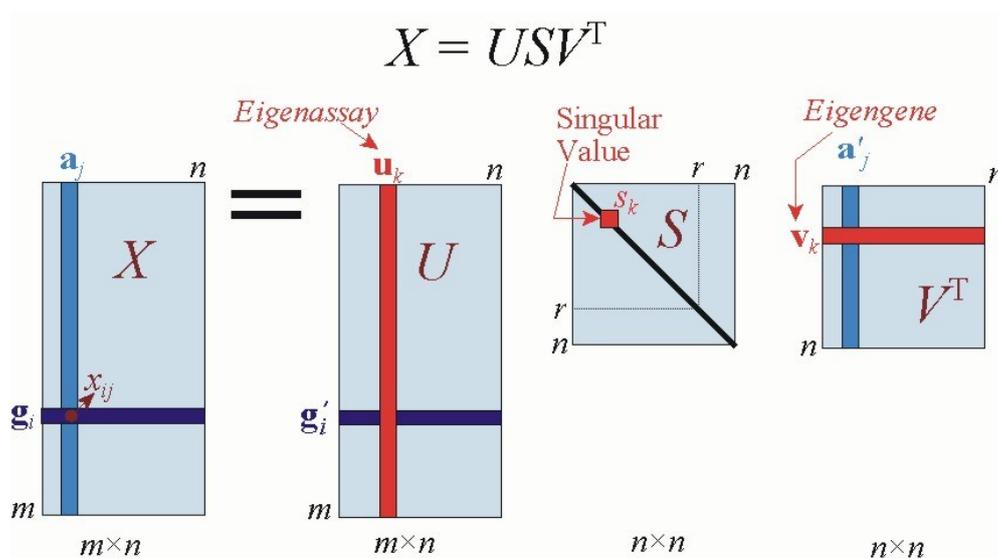


Figura 71 Illustrazione grafica della Singular Value Decomposition su una matrice di dati

Questa tecnica riesce a identificare quali tra le Principal Components legate alle variabili in gioco ha maggiore importanza, attraverso la Singular Value Decomposition (SVD), descritta nel capitolo 4 nell'ambito dell'identificazione dinamica, e a partire da questa quale delle variabili ha maggiore rilevanza.

La tecnica di Singular Value Decomposition decompone la matrice delle variabili e delle osservazioni in nelle matrici U, S e V, e a partire dalla matrice delle covarianze S è possibile definire la variabile più rilevante.

Il tutto è stato realizzato grazie ad uno script Matlab e al comando di Matlab *svd* che applica la Singular Value Decomposition a partire dai vari set di dati. Purtroppo l'assenza di dati per lunghi lassi di tempo ha reso necessario colmare questi vuoti tramite metodi statistici di Matlab che permettono di darne una predizione, più o meno affidabile in base al numero di dati a disposizione, e quindi applicare la tecnica SVD.

Sono stati quindi analizzati i seguenti dati :

- dati di temperatura acquisiti dal termometro n°7 posto sull'ellisse interno in corrispondenza del tamburo a quota +32 m;
- dati di ampiezza della fessura acquisiti dal fessurimetro n°8 posto sulla lato ovest della cupola;
- dati di profondità di falda acquisiti dal piezometro n°1;
- dati di convergenza dell'asse minore della cupola;
- dati di pressione acquisiti dalla cella di pressione n°12 posta all'estradosso della cupola a quota +50 m;
- dati di forza acquisiti dalla cella di carico n°11 posta in direzione sud-ovest.

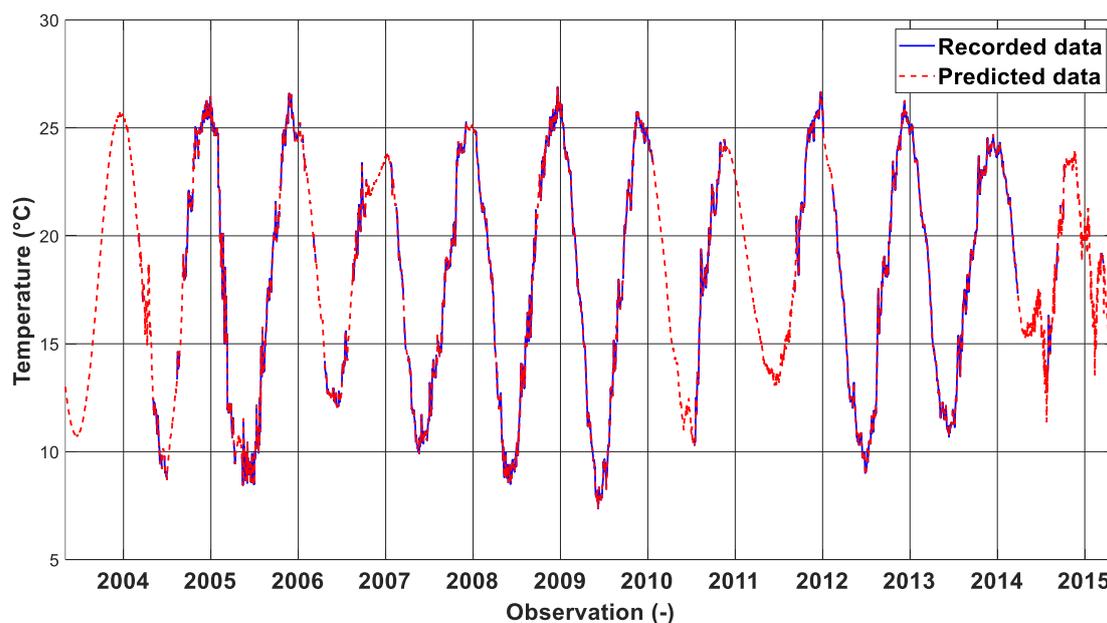


Figura 72 Trend termometro n°7

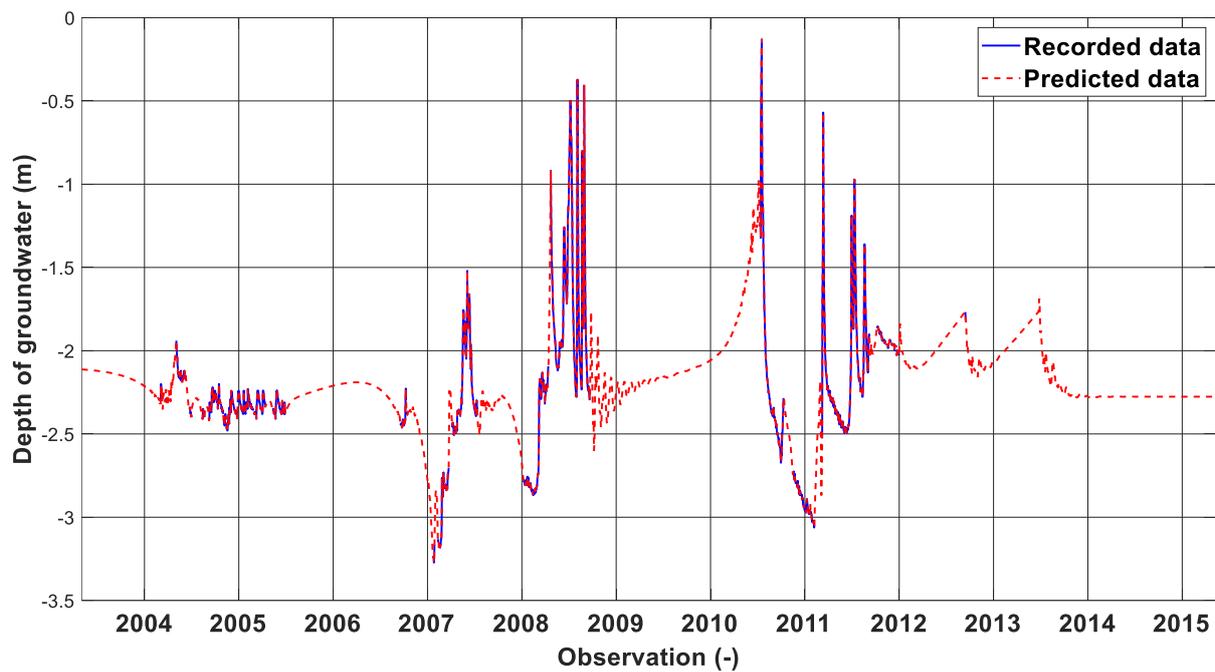


Figura 73 Trend piezometro n°1

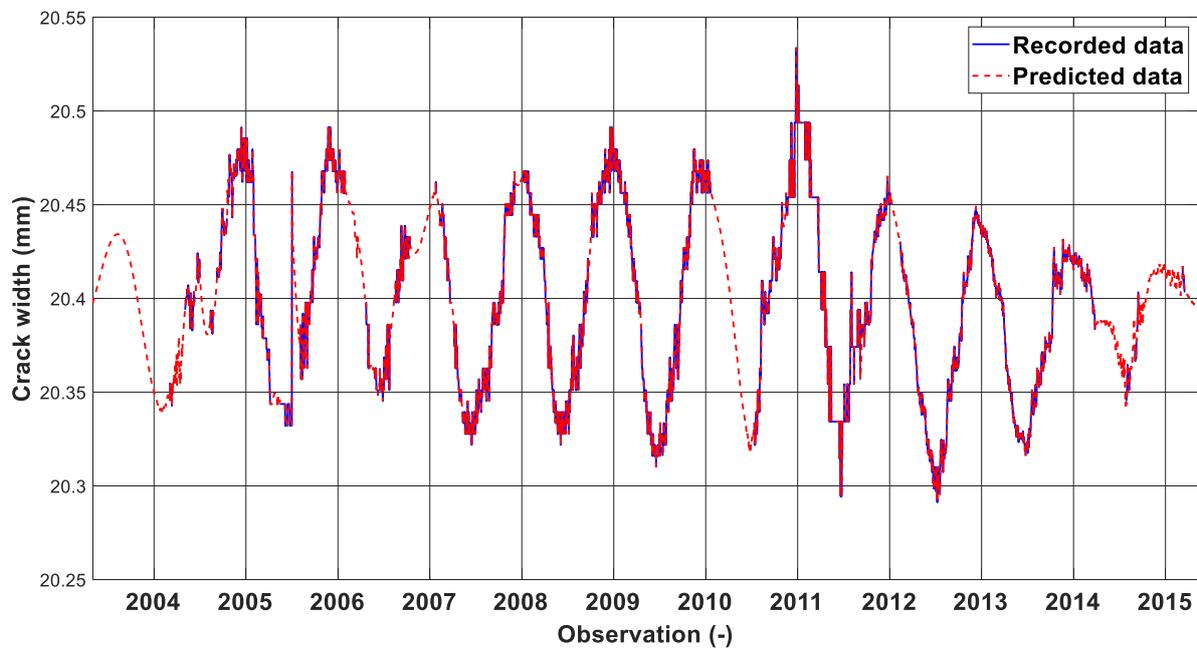


Figura 74 Trend fessurimetro n°8

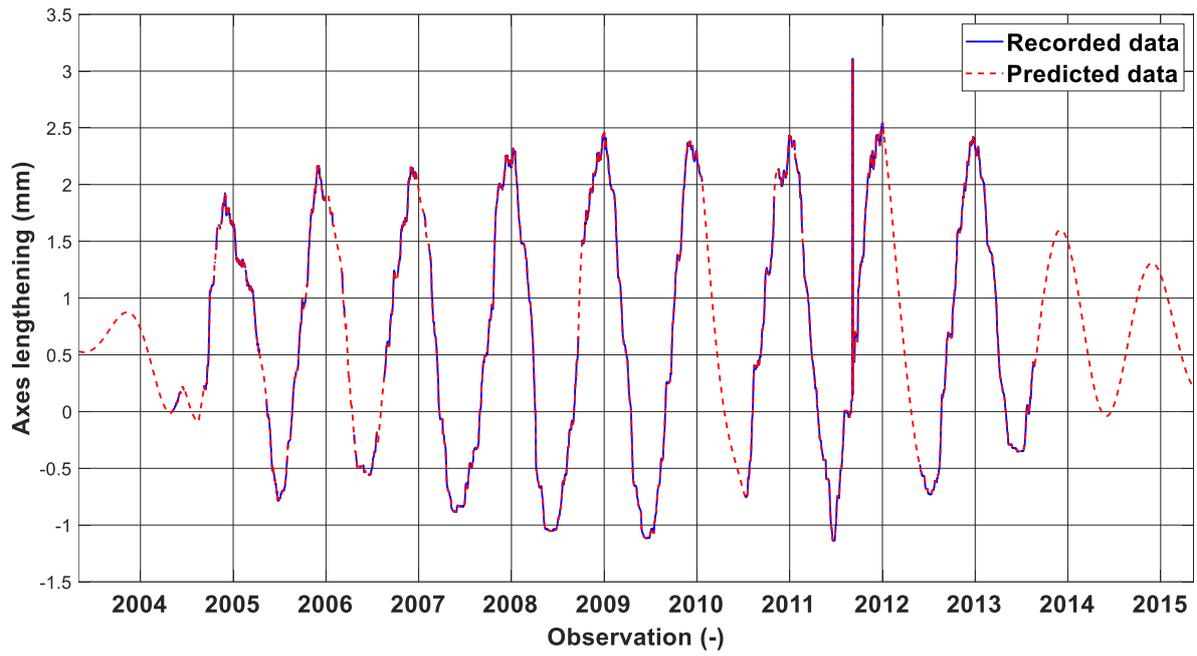


Figura 75 Trend convergenza asse minore

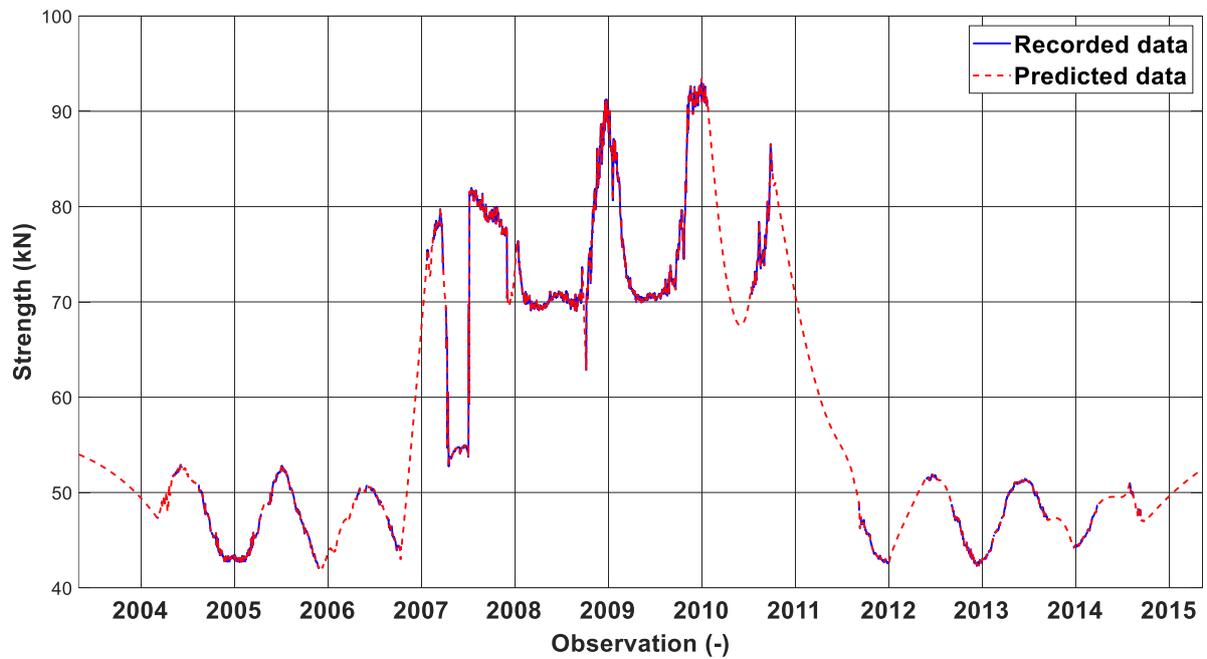


Figura 76 Trend cella di carico n°11

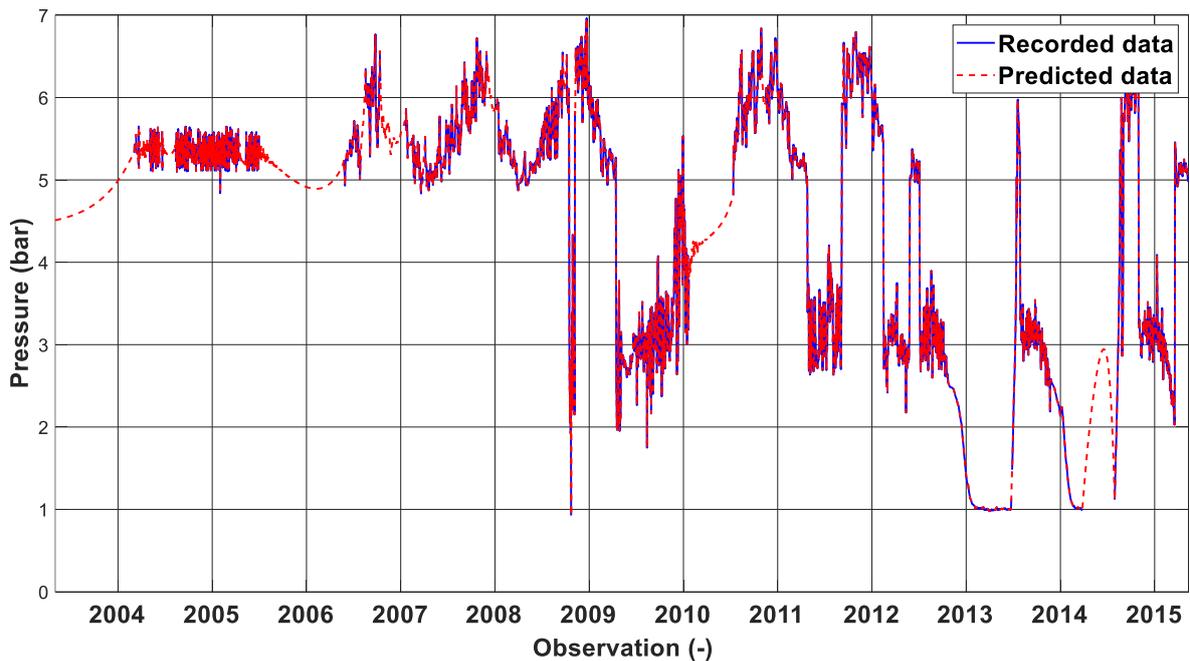


Figura 77 Trend cella di pressione n°12

5.3.2 Modelli di regressione e analisi di correlazione

L'analisi della regressione è una tecnica usata per analizzare una serie di dati che consistono in una variabile dipendente e una o più variabili indipendenti. Lo scopo è stimare un'eventuale relazione funzionale esistente tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti. La variabile dipendente nell'equazione di regressione è una funzione delle variabili indipendenti più un termine d'errore. Quest'ultimo è una variabile casuale e rappresenta una variazione non controllabile e imprevedibile nella variabile dipendente. I parametri sono stimati in modo da descrivere al meglio i dati. Il metodo più comunemente utilizzato per ottenere le migliori stime è il metodo dei minimi quadrati, ma sono utilizzati anche altri metodi.

Per realizzare l'analisi di regressione è stato utilizzato il tool di Matlab 'Regression Learner'. L'app 'Regression Learner' utilizza numerosi modelli di regressione per prevedere i dati. Usando questa funzione è possibile esplorare un set di dati, selezionarne le funzionalità, specificare schemi di convalida, formare modelli e valutare i risultati. È possibile eseguire un training automatico per cercare il miglior modello di regressione, suddivisi in modelli di regressione lineare, alberi di regressione, modelli di regressione del processo gaussiano, macchine vettoriali di supporto e gruppi di alberi di regressione.

È possibile utilizzare l'applicazione per analizzare automaticamente un set di dati utilizzando i vari modelli proposti.

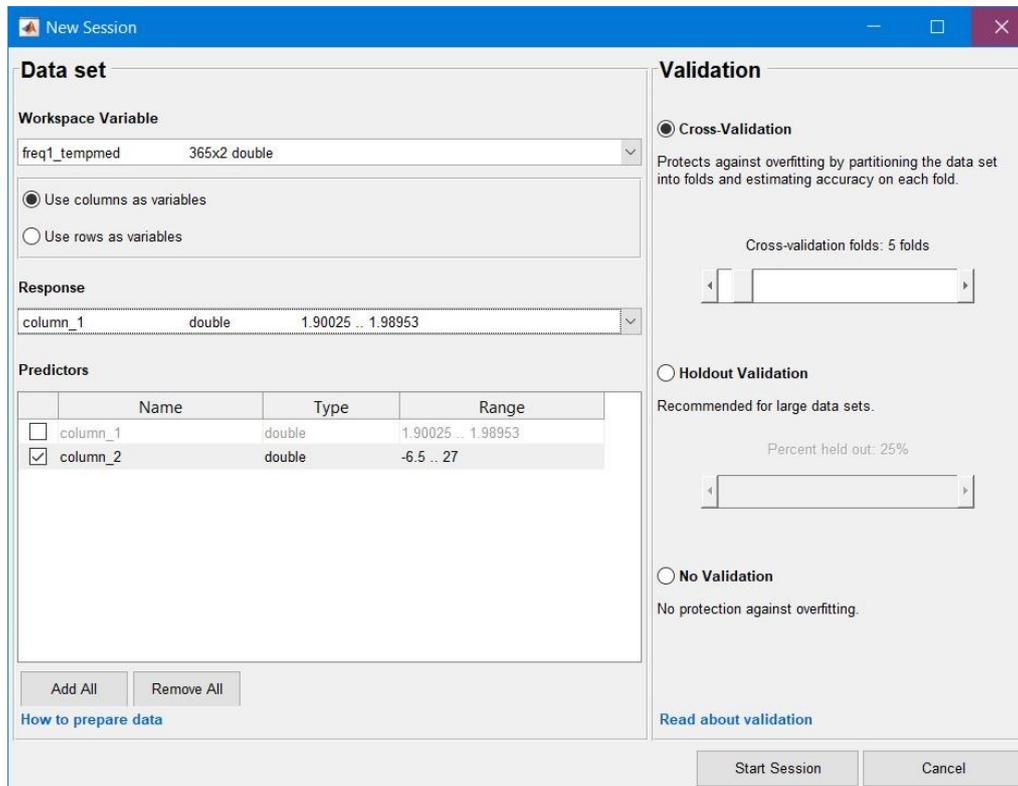


Figura 78 Finestra tool Regression Learner selezione input

Tra questi possiamo trovare:

- Modelli di regressione lineare:
 - Linear,
 - Interactions linear,
 - Robust Linear,
 - Stepwise linear;
- Alberi di regressione:
 - Fine tree,
 - Medium tree,
 - Coarse tree;
- Support Vector Machines:
 - Linear SVM,
 - Quadratic SVM,
 - Cubic SVM,
 - Fine Gaussian SVM,

- Medium Gaussina SVM,
- Coarse Gaussian SVM;
- Modelli di regressione secondo il processo gaussiano:
 - Rational Quadratic,
 - Squared Exponential,
 - Matern 5/2,
 - Exponential;
- Alberi di insiemi:
 - Boosted Trees,
 - Bagged Trees.

Il tool è in grado di fare un'analisi di correlazione utilizzando tutti i modelli predefiniti e definendo quello che meglio si adatta al set di dati analizzati.

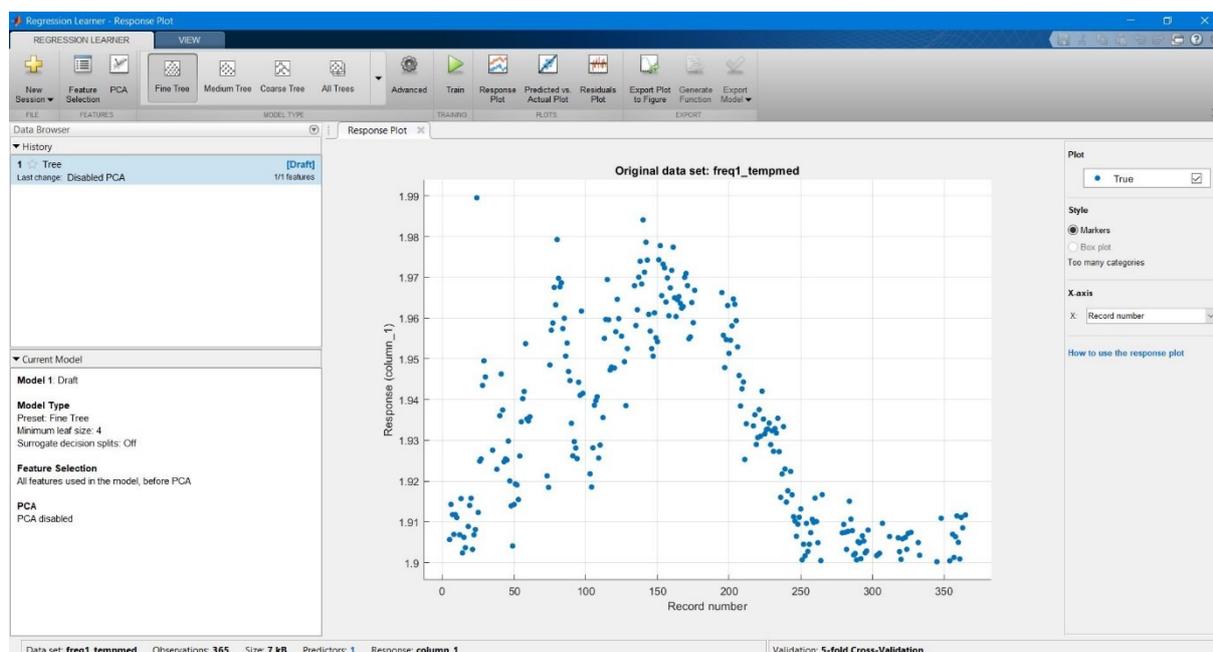


Figura 79 Finestra tool Matlab Regression Learner per la scelta dei modelli di regressione

Il tool calcola automaticamente una serie di indicatori del livello di correlazione tra le variabili in esame:

1. RMSE,
2. R-squared,
3. MAE,
4. MSE.

Lo scarto quadratico medio o Root Mean Square Error (RMSE) rappresenta la deviazione standard delle differenze tra valori predetti e valori osservati,

Il valore di RMSE è calcolato come

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}$$

Dove n è il numero di valori y_j e \hat{y}_j è il suo valore predetto. Un valore basso di RMSE corrisponde ad una maggiore correlazione tra le variabili.

Il valore di MAE è la media del valore assoluto delle differenze tra i valori predetti e i valori osservati; questo è un indicatore lineare, cioè tutte le differenze individuali hanno lo stesso peso nella media, e lo stesso vale per il RMSE. Il MAE è calcolato come:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j|$$

Un valore basso di MAE corrisponde ad una maggiore correlazione tra le variabili.

L'indicatore MSE è la media dei quadrati dei residui. Un basso valore di MSE indica un buon livello di correlazione. Questo è calcolato come:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2$$

L'indice R-squared spiega quanto bene la variabile indipendente spiega la variabilità nella variabile dipendente. È calcolato come:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Il numeratore è il MSE e il denominatore è la varianza dei valori. Più è alto il MSE più è piccolo il R-squared e minore è la correlazione.

Di seguito le analisi di correlazione tra dati ambientali e dati statici o dinamici.

5.3.2.1 Vento

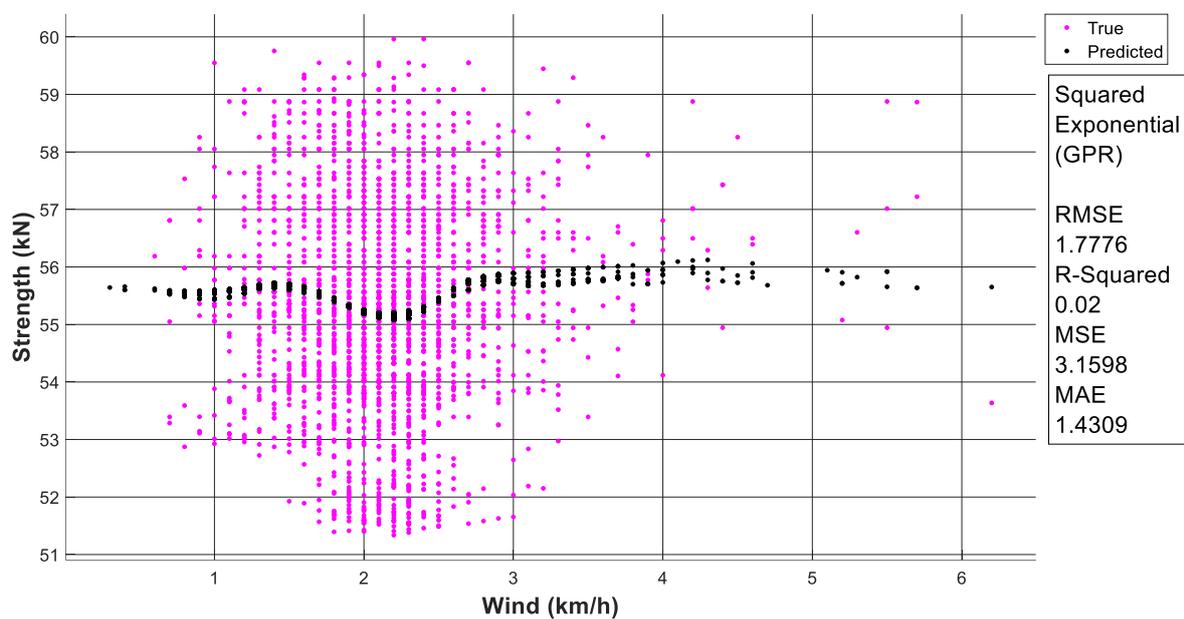


Figura 80 Modello di regressione forza nelle barre di acciaio-vento

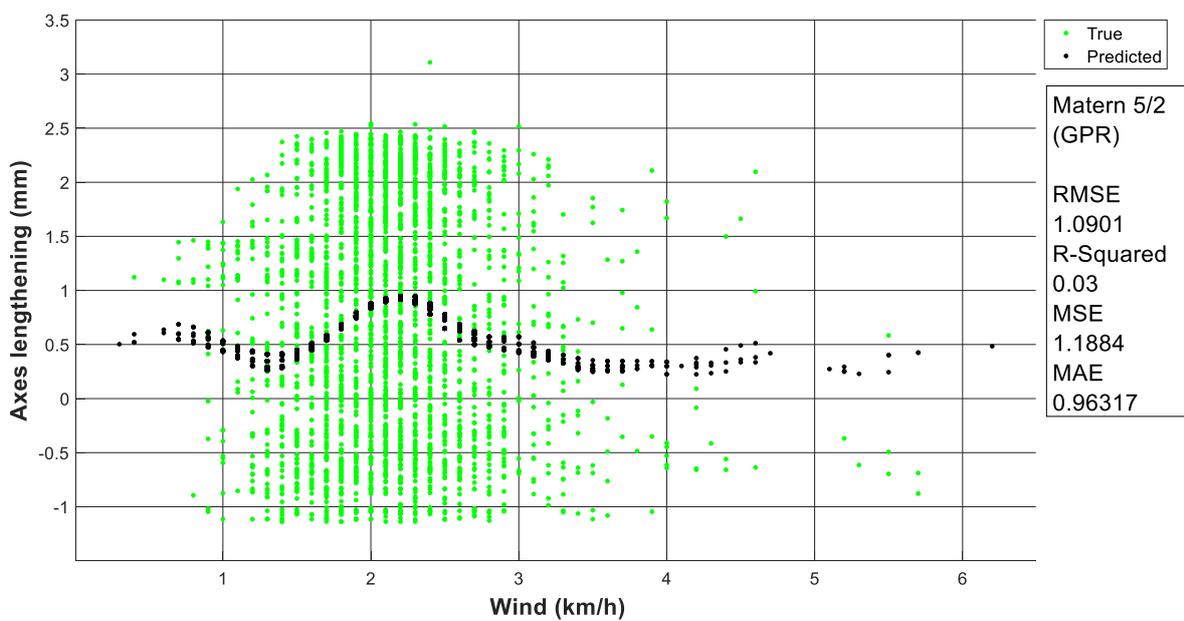


Figura 81 Modello di regressione convergenza asse minore-vento

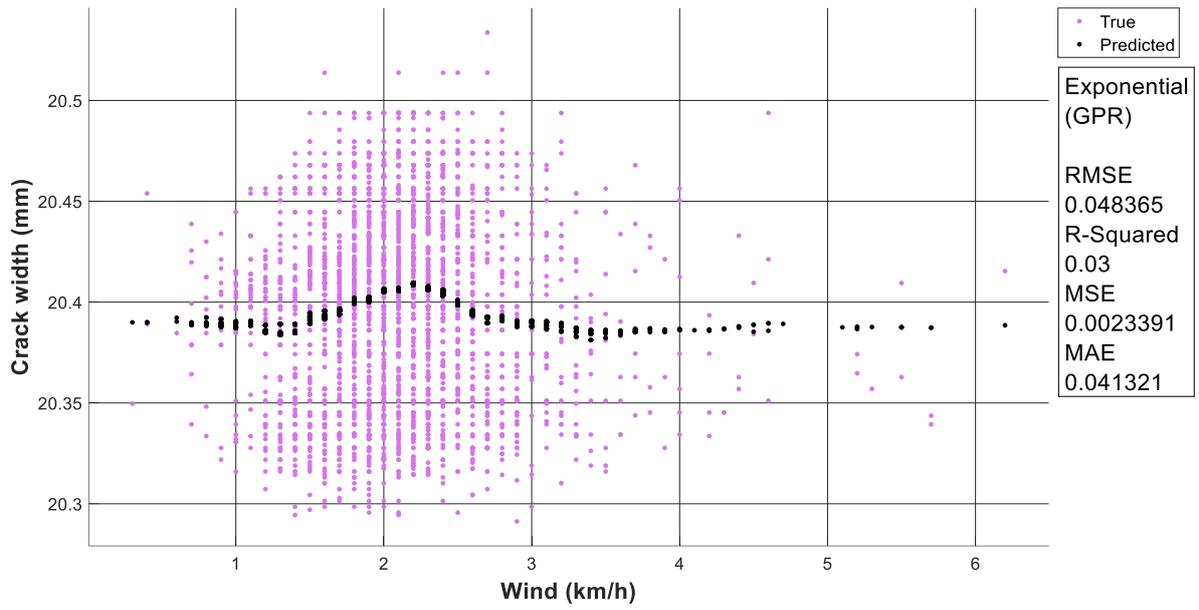


Figura 82 Modello di regressione ampiezza fessure-vento

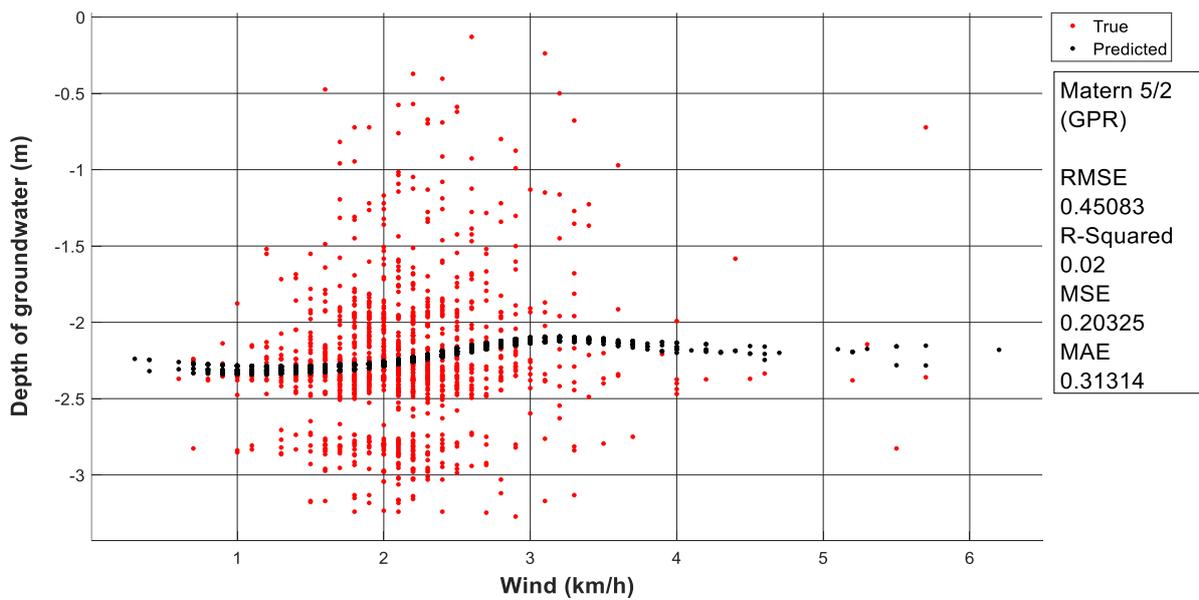


Figura 83 Modello di regressione profondità di falda-vento

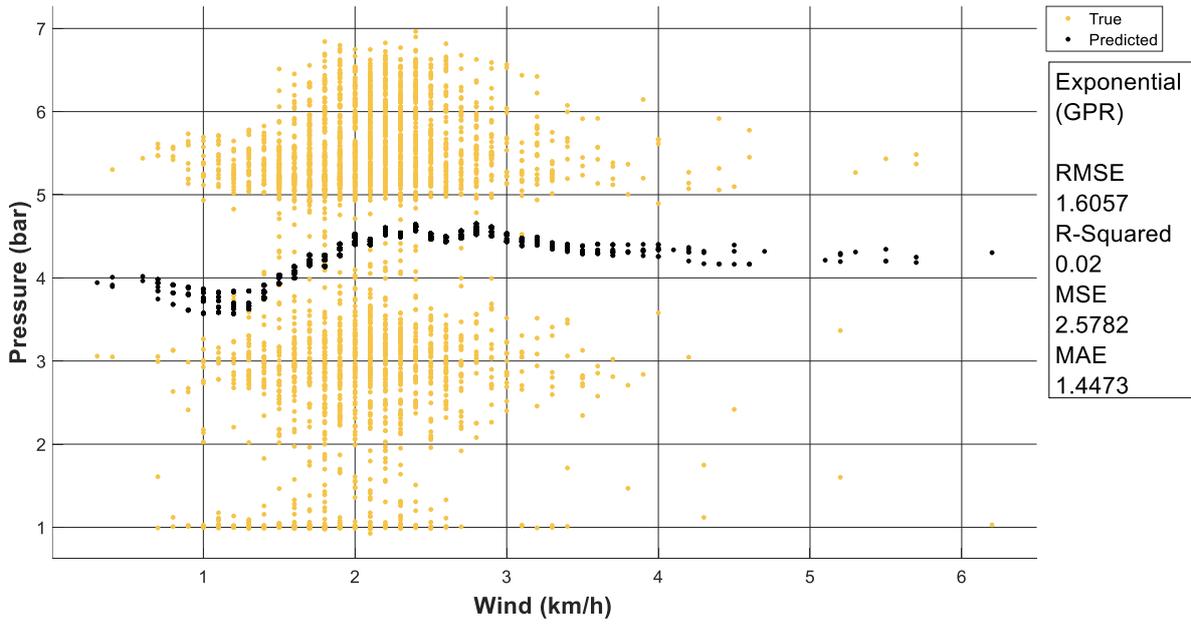


Figura 84 Modello di regressione pressione nella muratura-vento

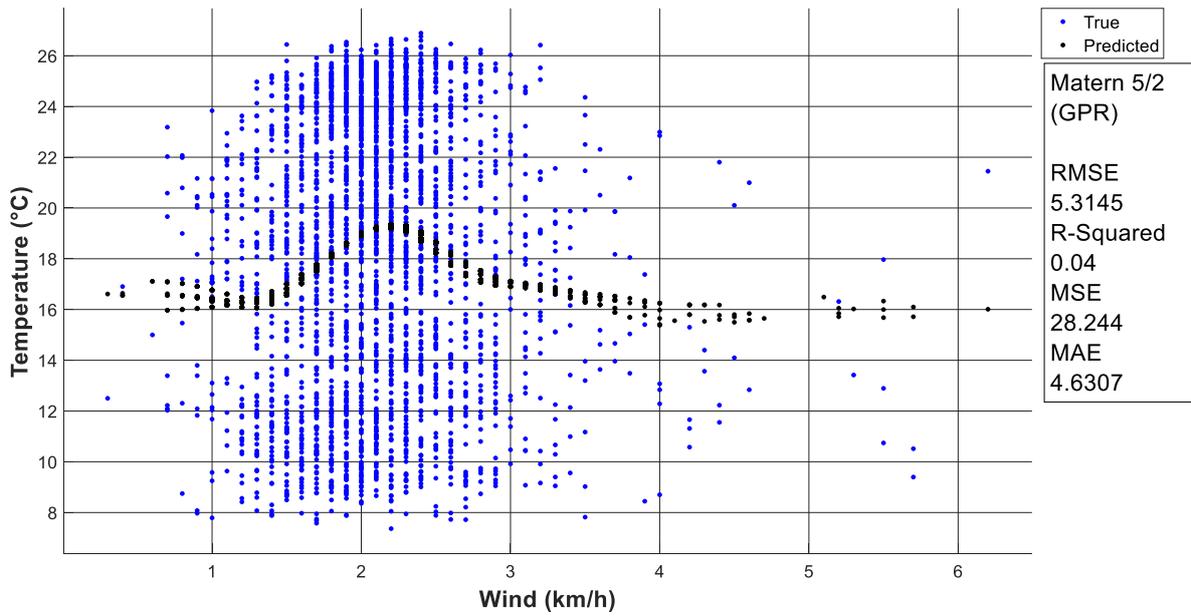


Figura 85 Modello di regressione temperatura-vento

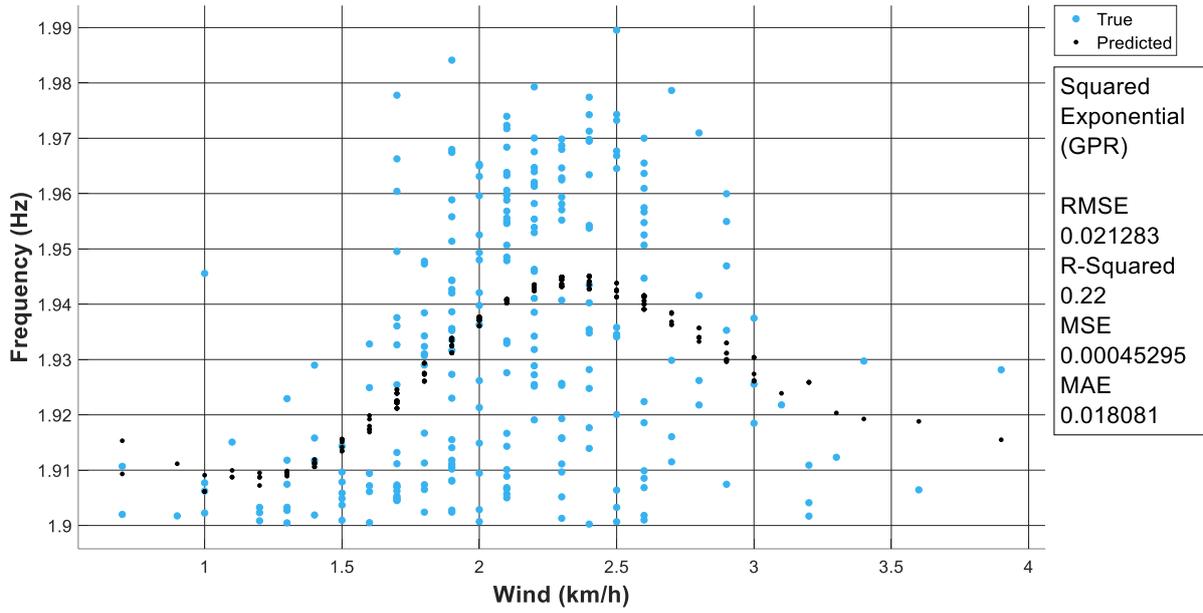


Figura 86 Modello di regressione frequenza 1-vento

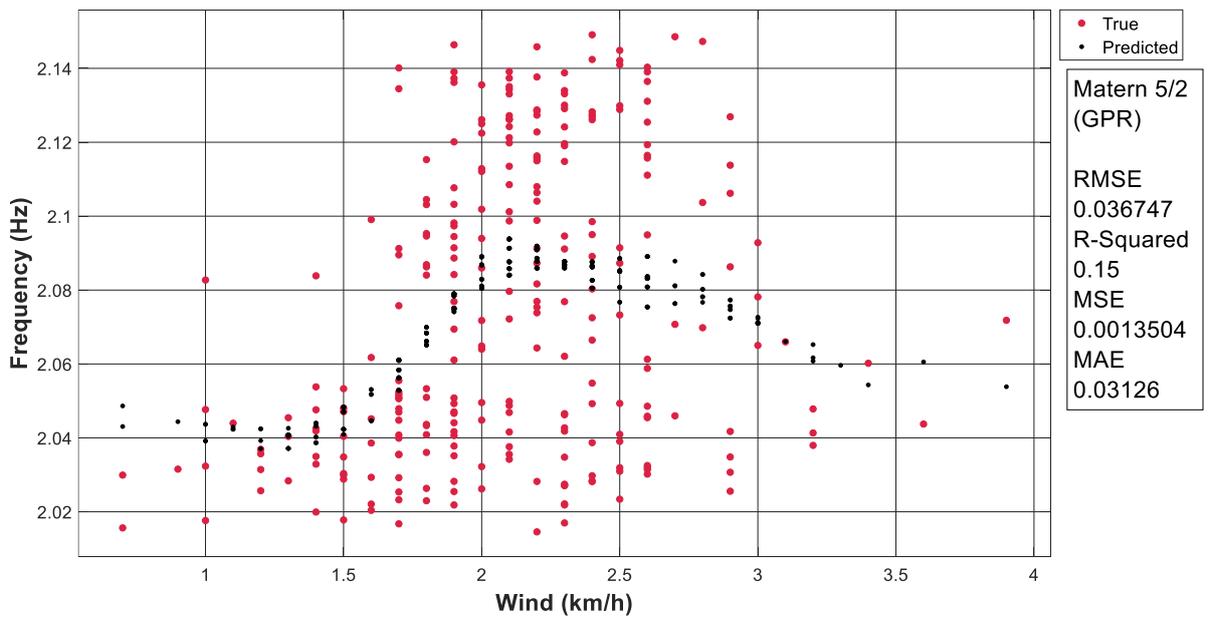


Figura 87 Modello di regressione frequenza 2-vento

5.3.2.2 Umidità

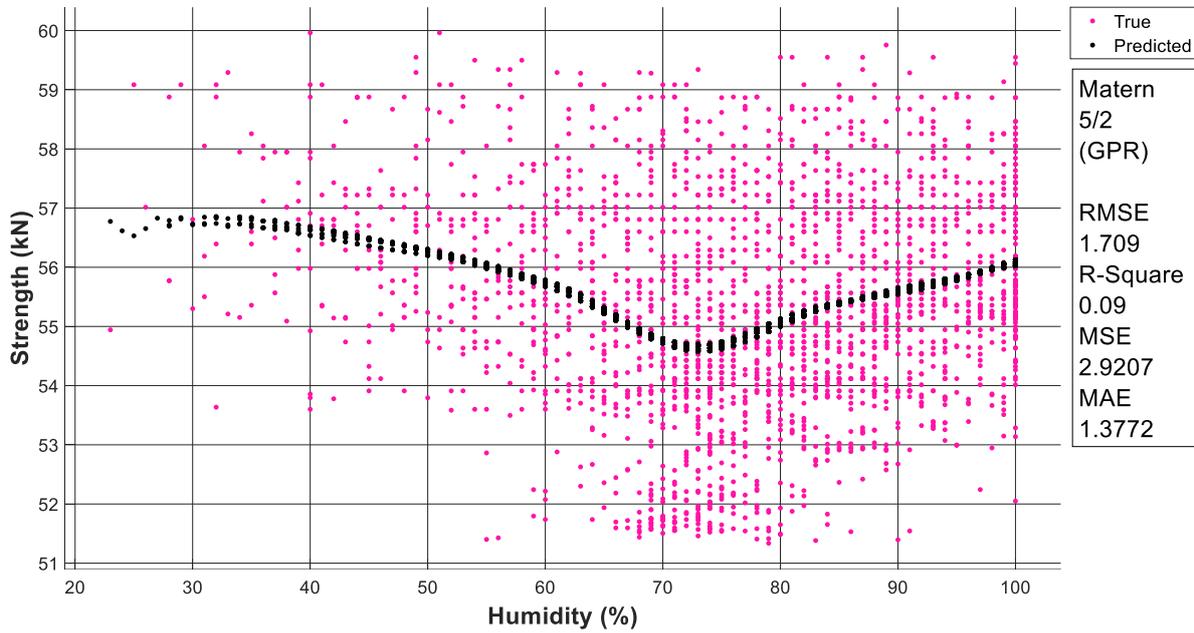


Figura 88 Modello di regressione forza nelle barre-umidità

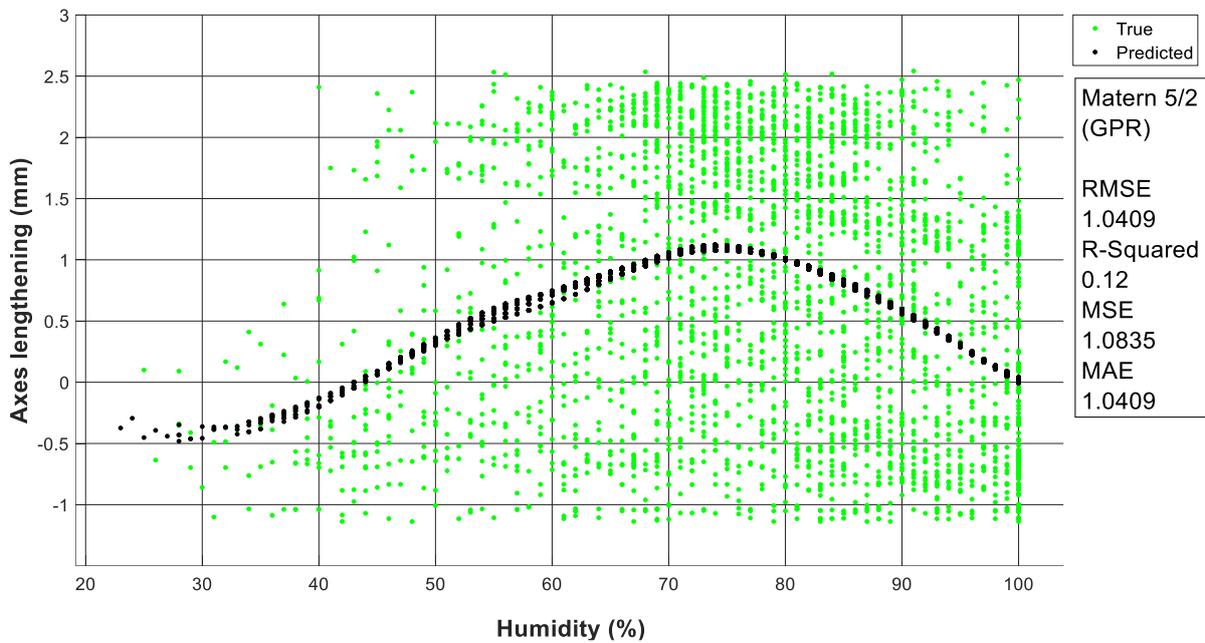


Figura 89 Modello di regressione convergenza asse minore-umidità

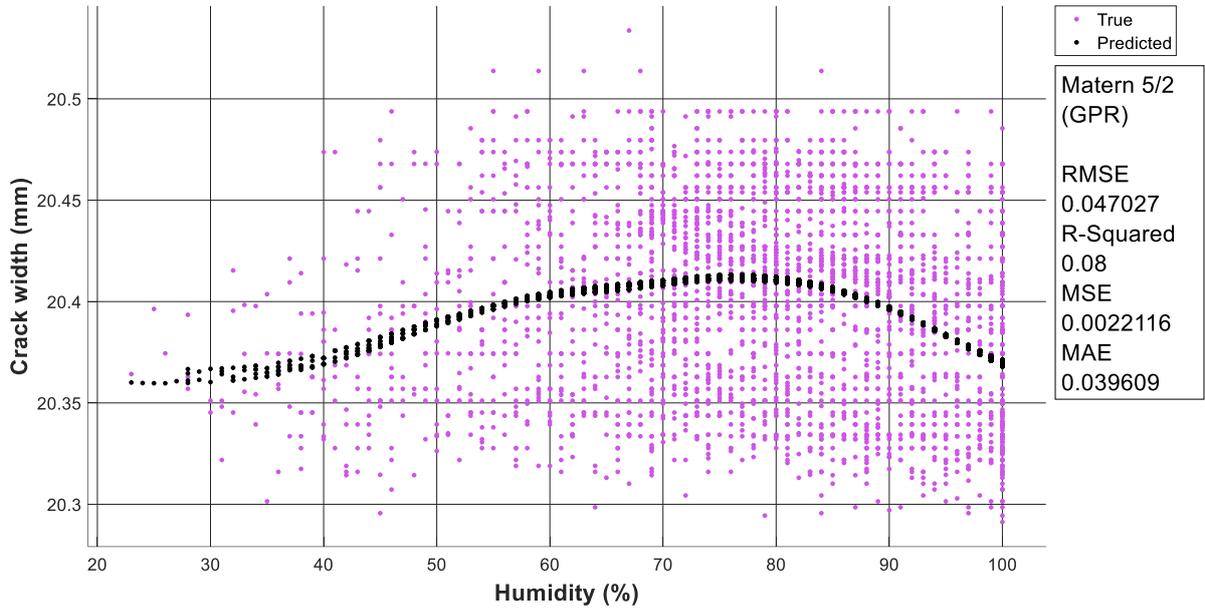


Figura 90 Modello di regressione ampiezza fessura-umidità

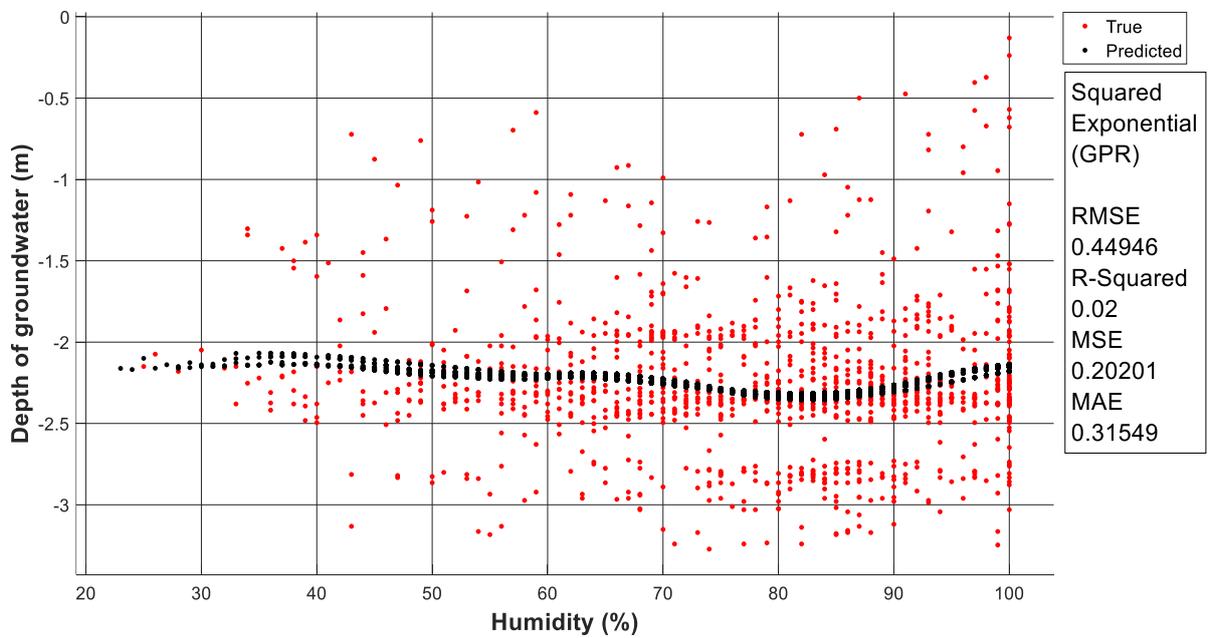


Figura 91 Modello di regressione profondità di falda-umidità

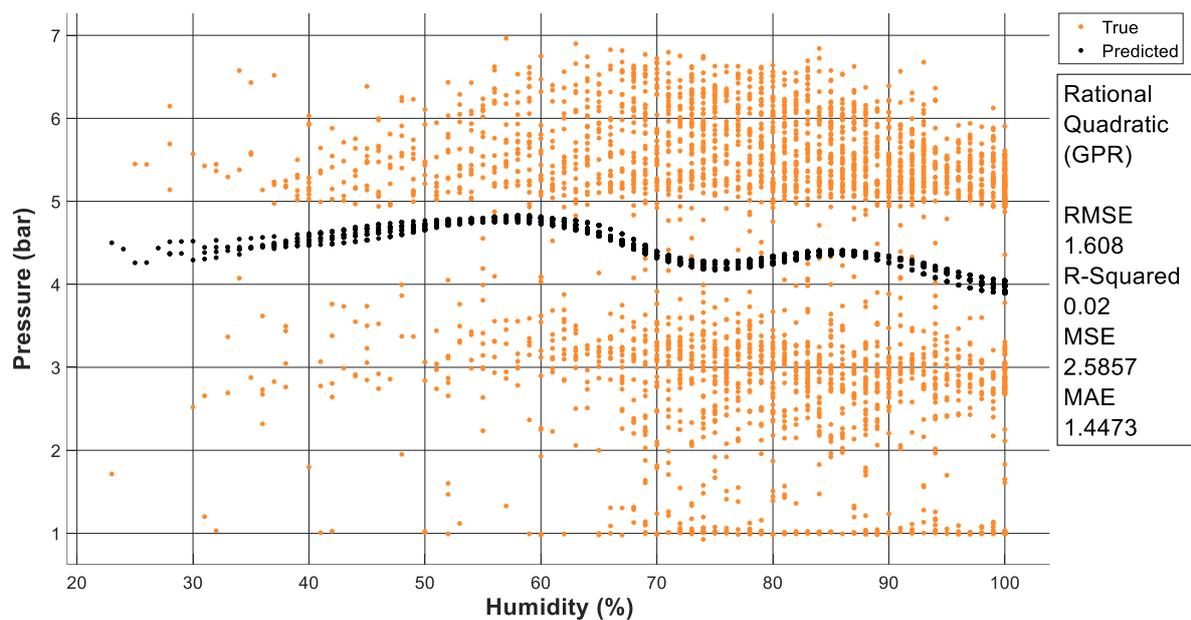


Figura 92 Modello di regressione pressione nella muratura-umidità

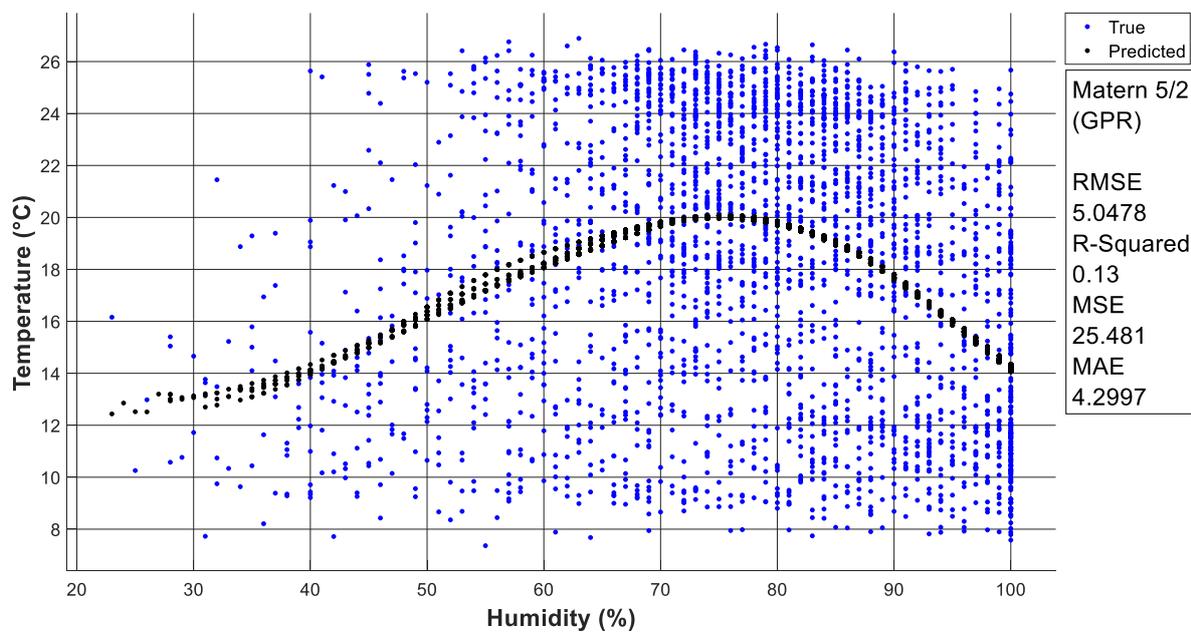


Figura 93 Modello di regressione temperatura-umidità

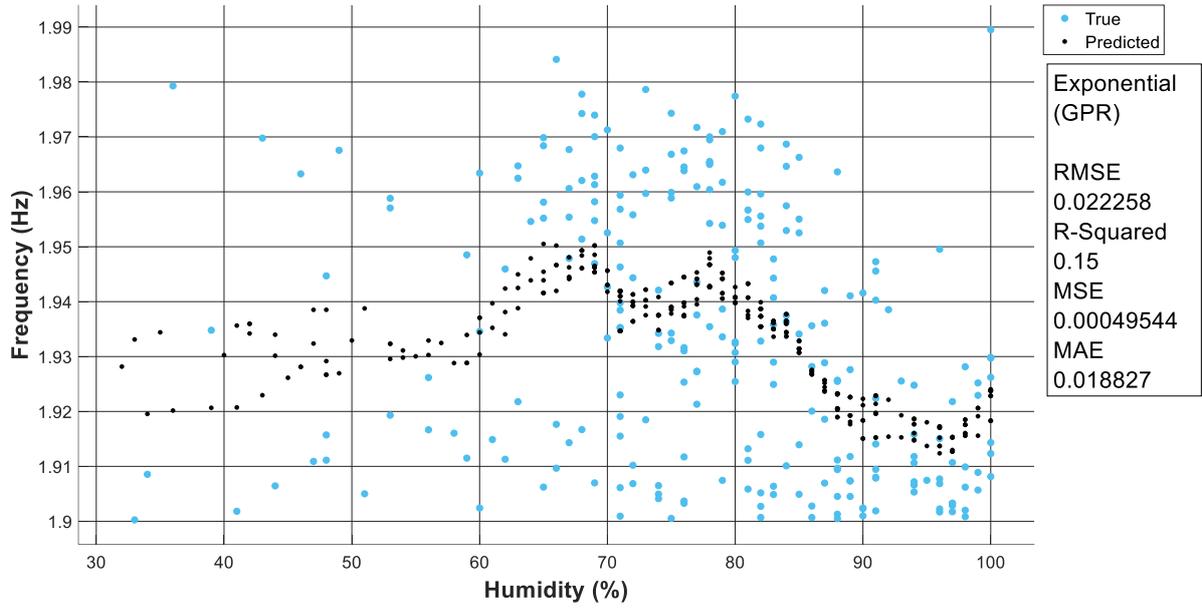


Figura 94 Modello di regressione frequenza 1-umidità

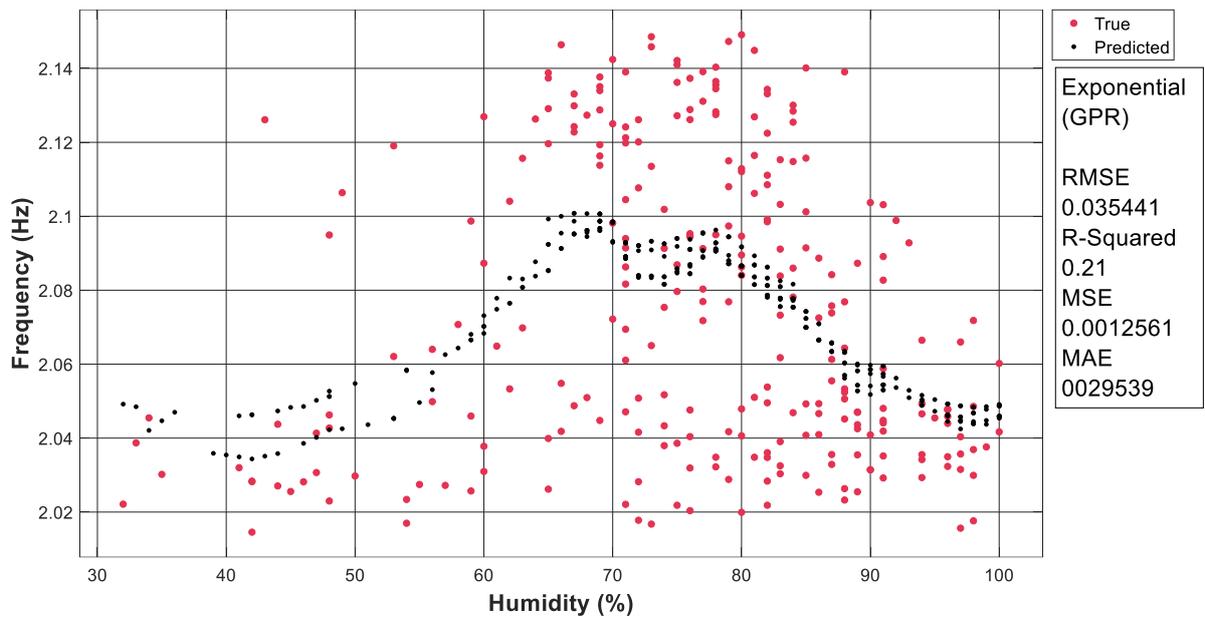


Figura 95 Modello di regressione frequenza 2-umidità

5.3.2.3 Altezza di precipitazione

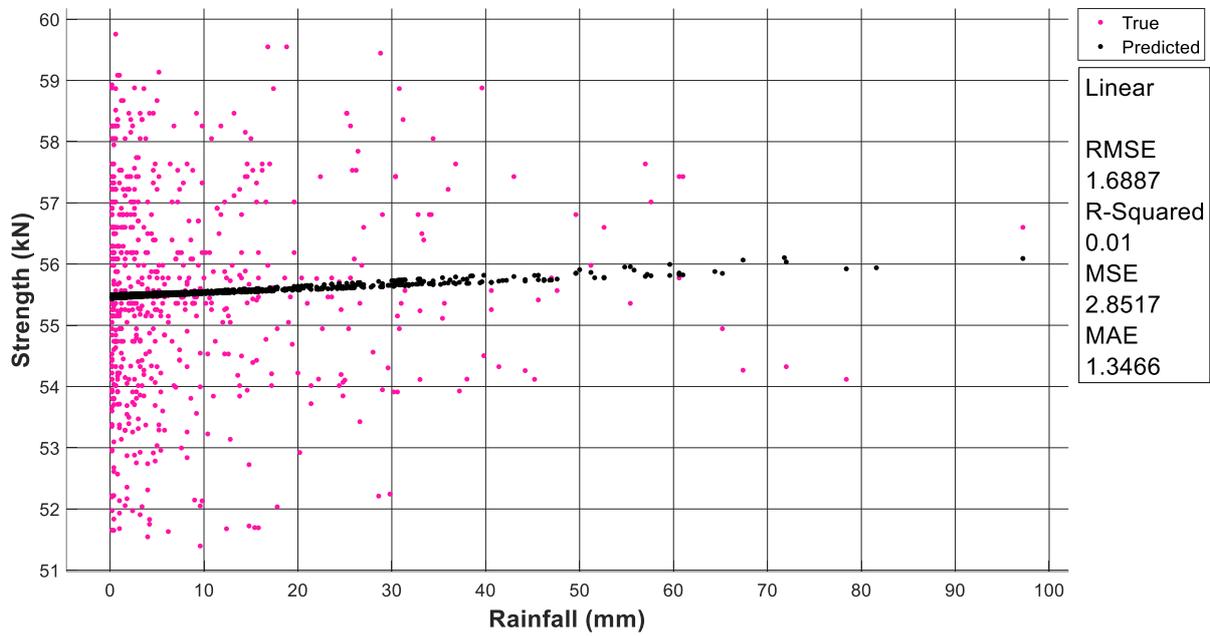


Figura 96 Modello di regressione forza nelle barre-altezza di precipitazione

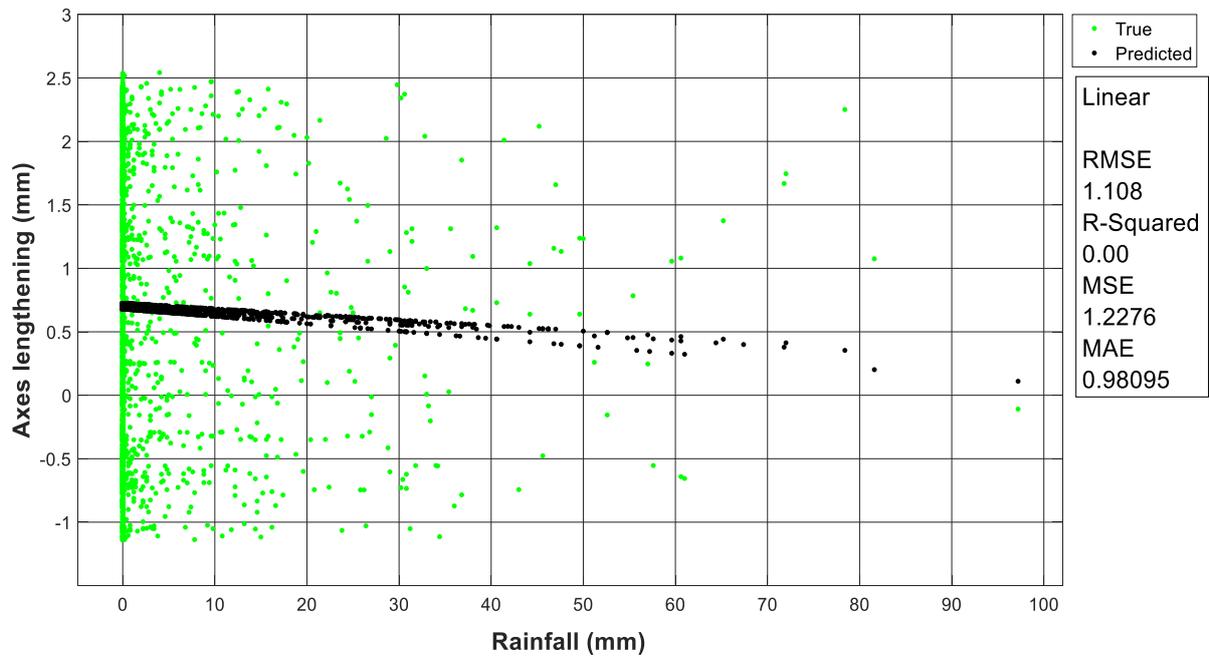


Figura 97 Modello di regressione convergenza asse minore-altezza di precipitazione

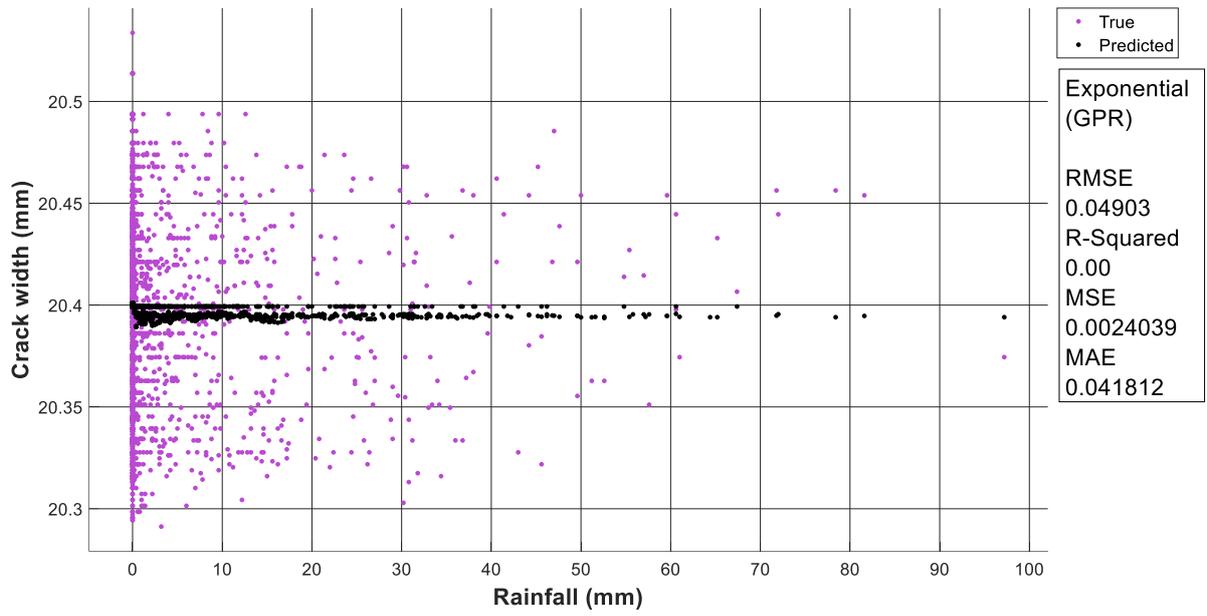


Figura 98 Modello di regressione ampiezza fessure-altezza di precipitazione

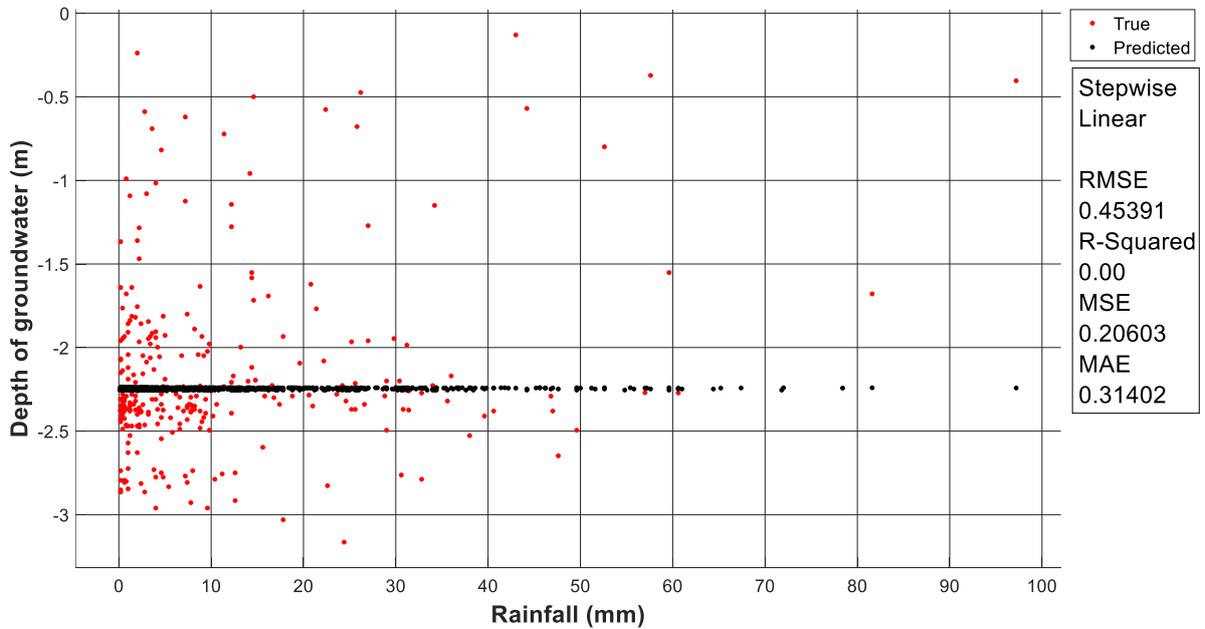


Figura 99 Modello di regressione profondità di falda-altezza di precipitazione

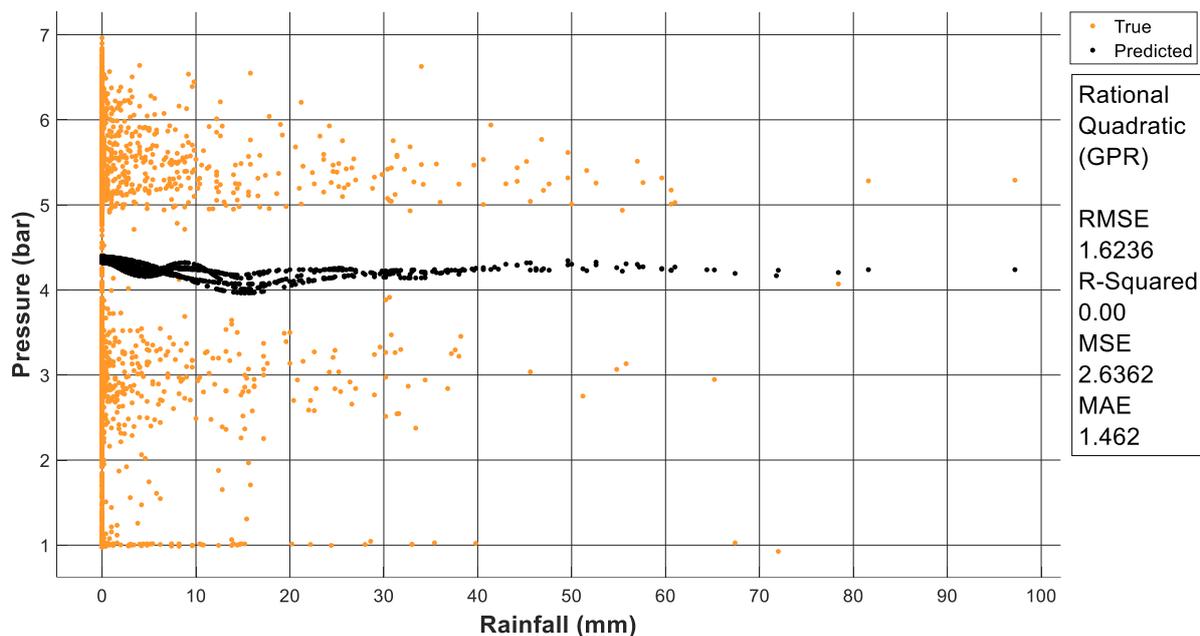


Figura 100 Modello di regressione pressione nella muratura-altezza di precipitazione

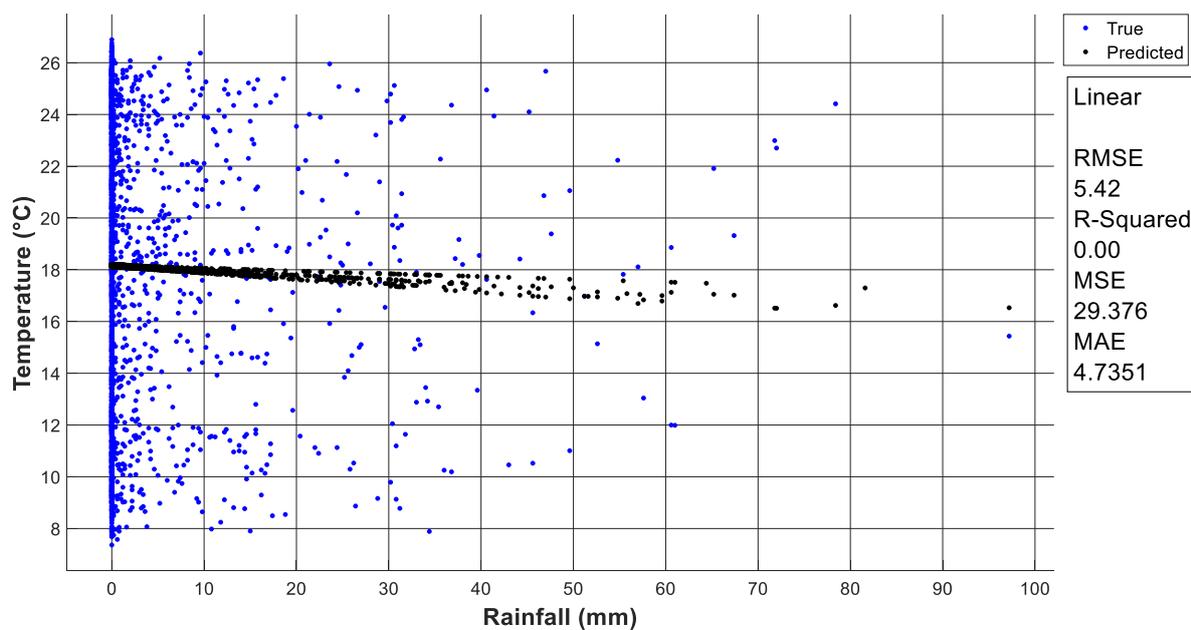


Figura 101 Modello di regressione temperatura-altezza di precipitazione

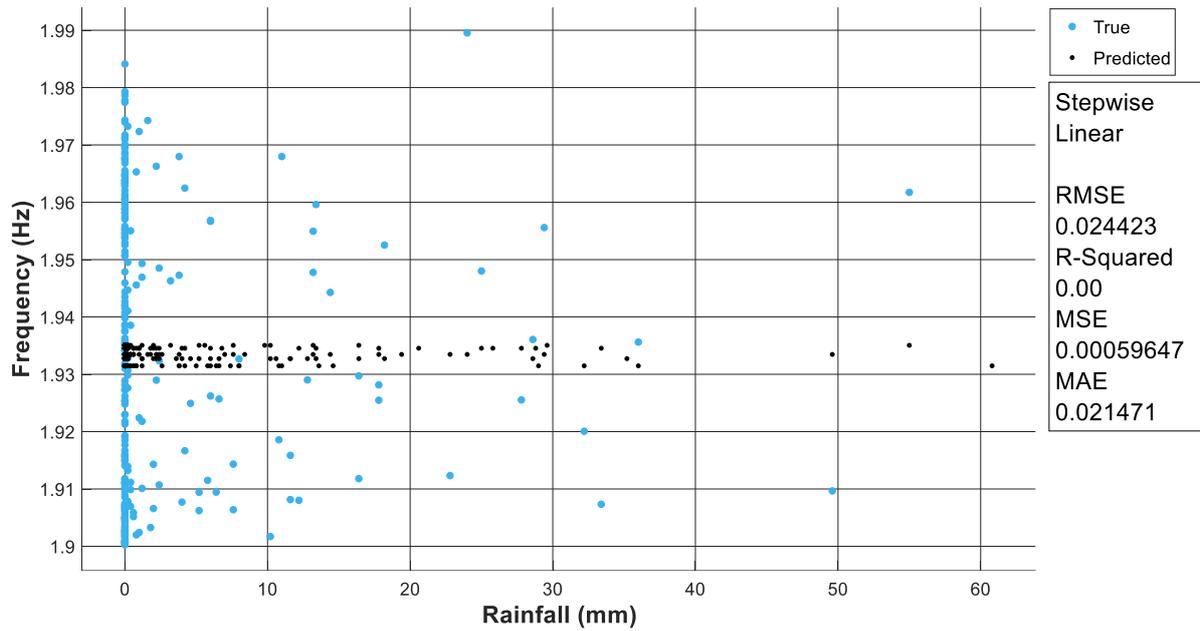


Figura 102 Modello di regressione frequenza 1-precipitazione

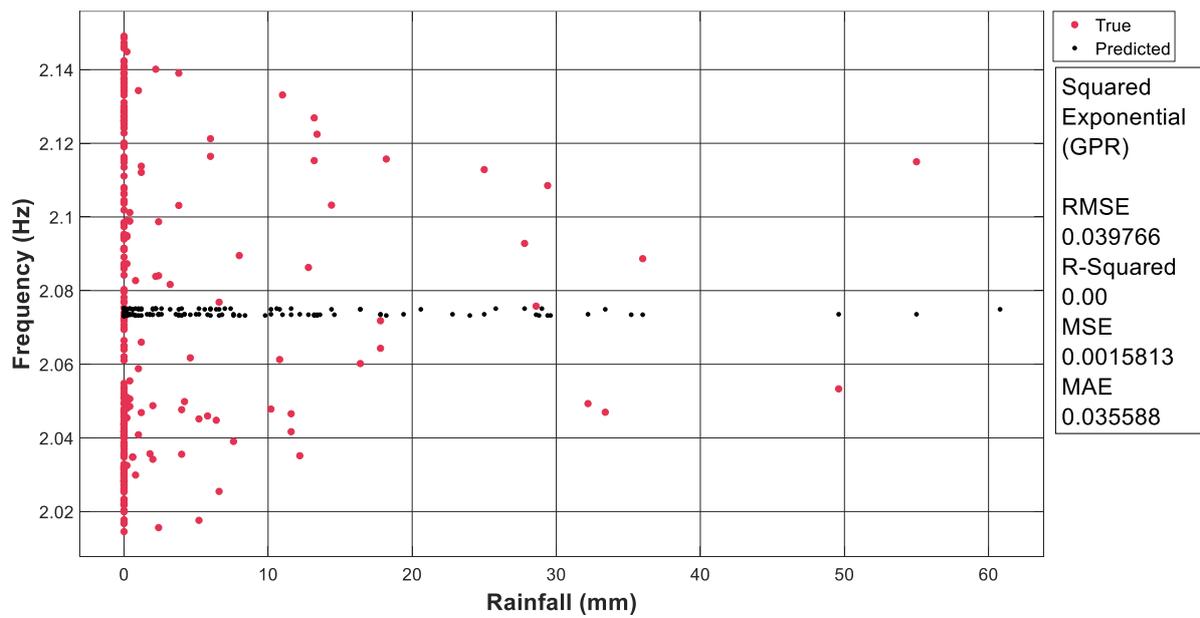


Figura 103 Modello di regressione frequenza 2- precipitazione

5.3.2.3 Neve

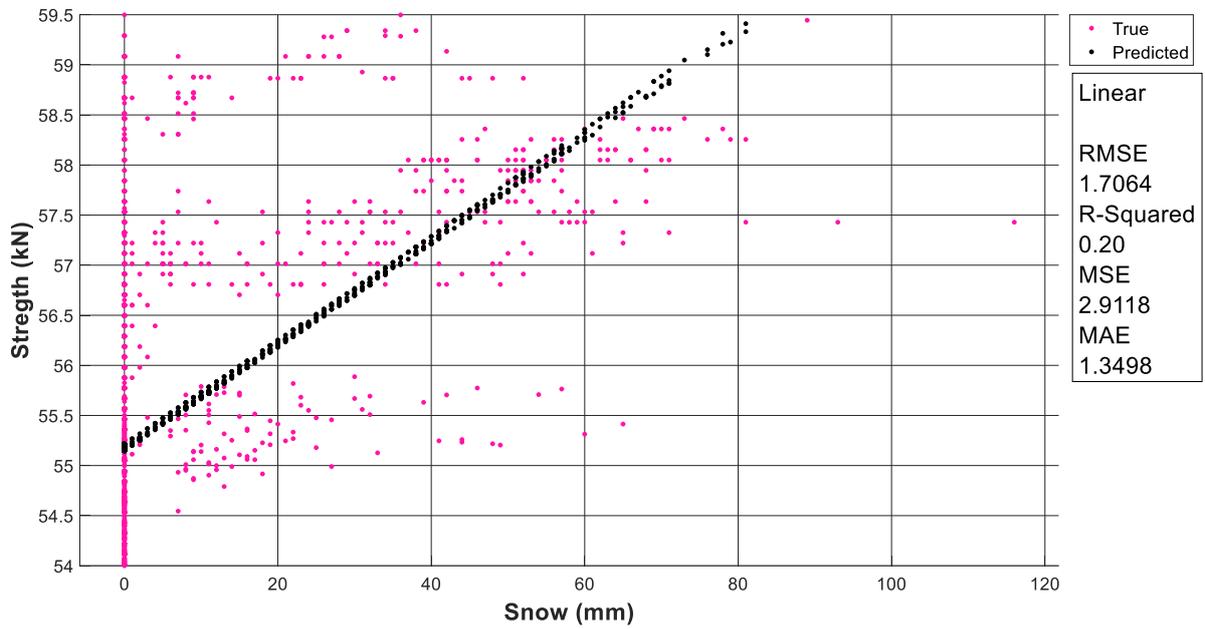


Figura 104 Modello di regressione forza nelle barre-neve

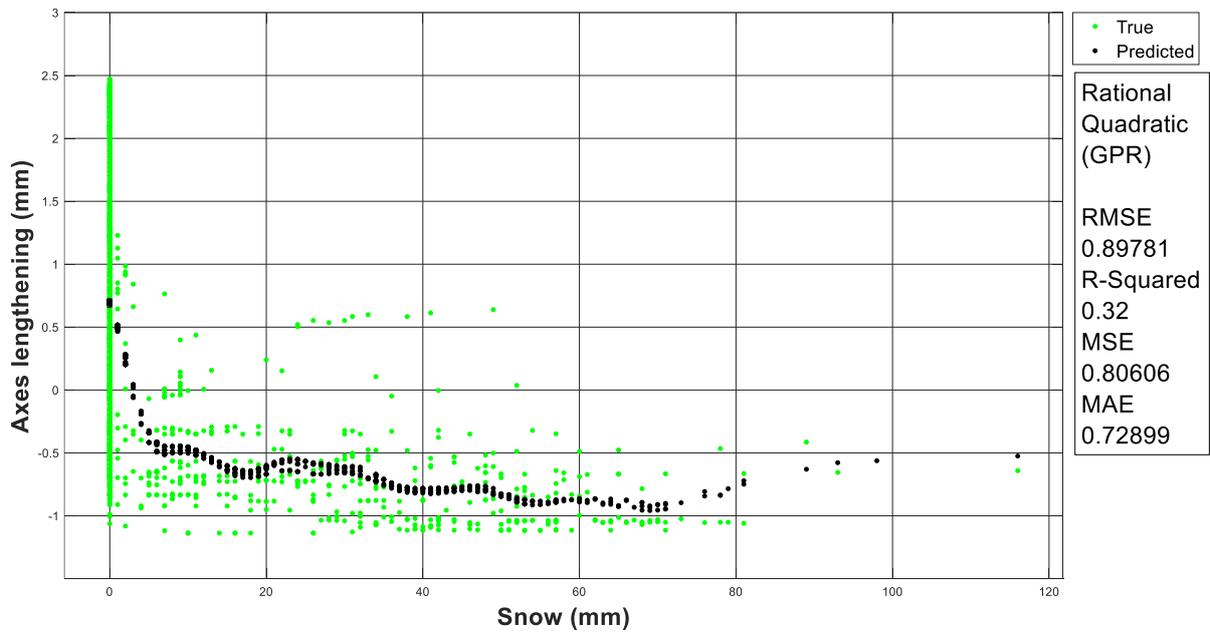


Figura 105 Modello di regressione convergenza asse minore-neve

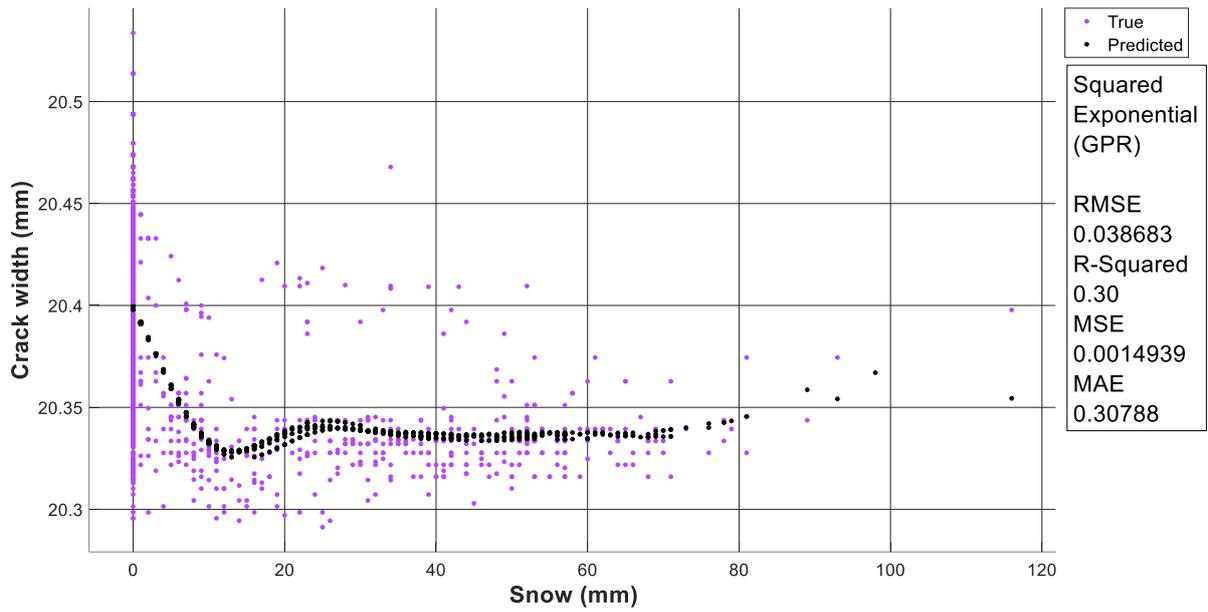


Figura 106 Modello di regressione ampiezza fessura-neve

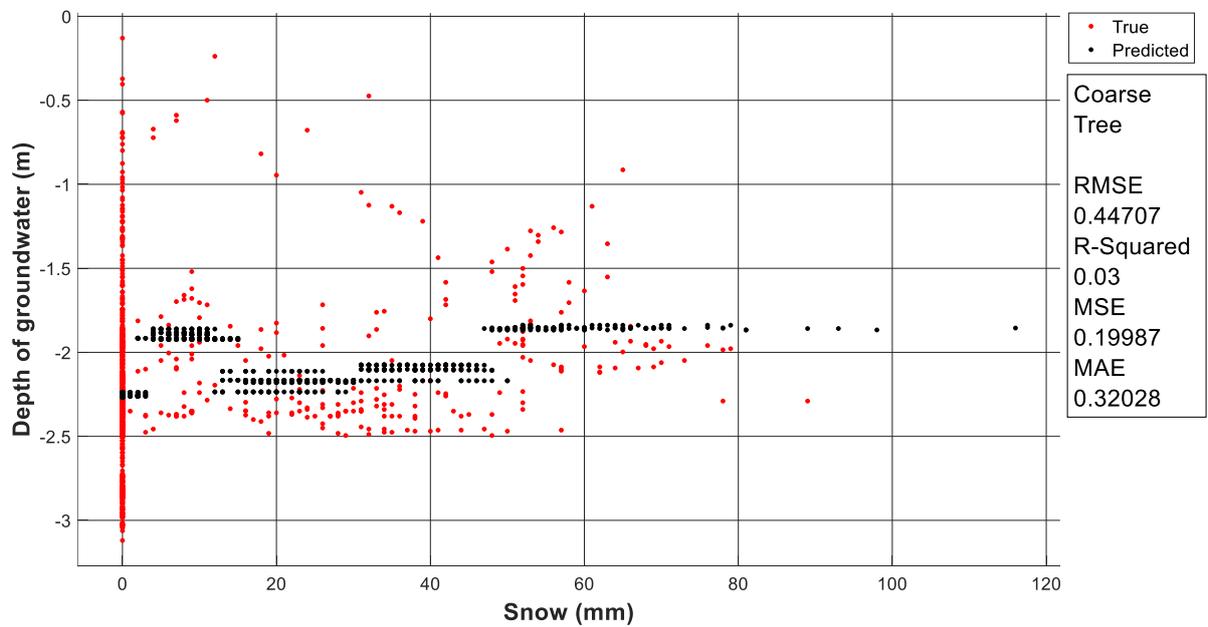


Figura 107 Modello di regressione profondità di falda-neve

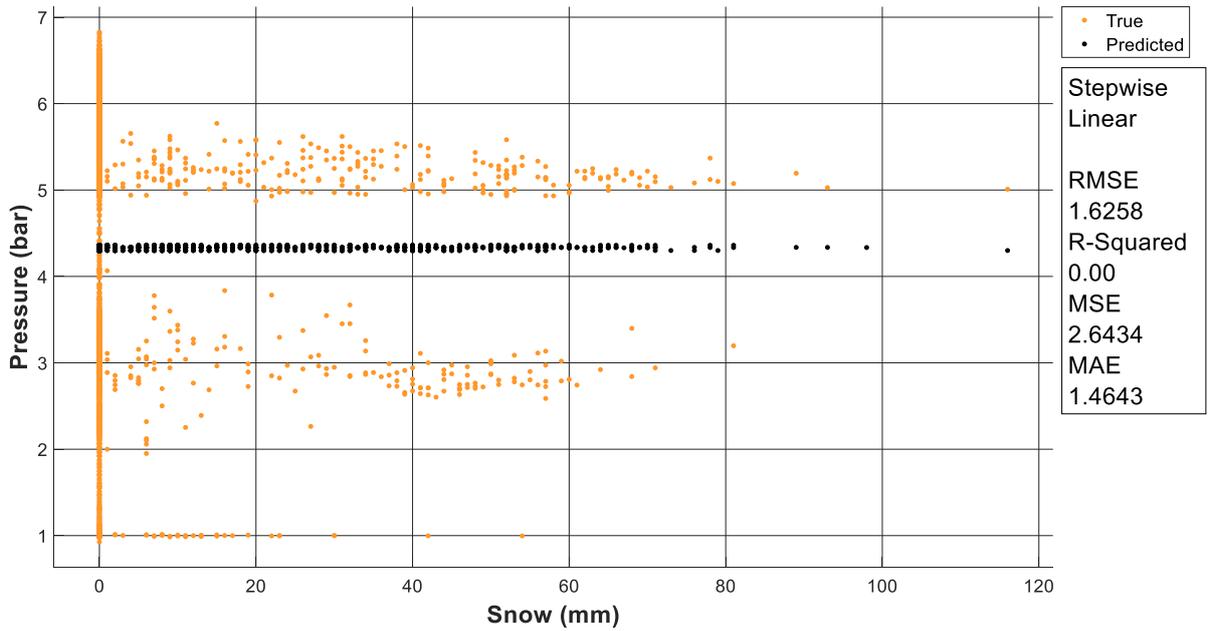


Figura 108 Modello di regressione pressione nella muratura-neve

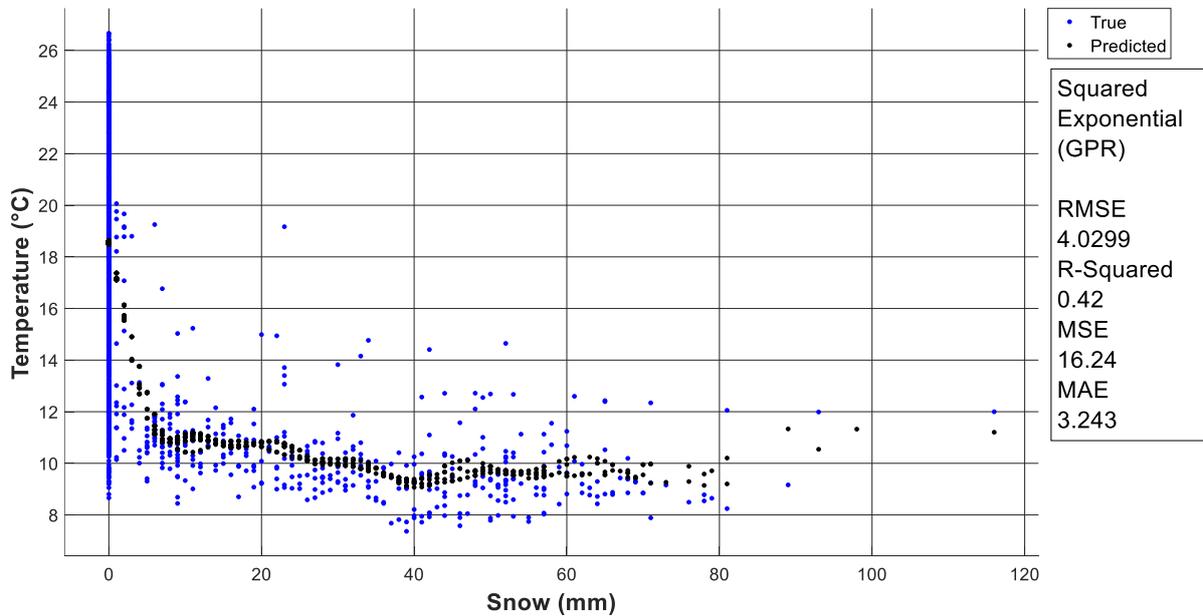


Figura 109 Modello di regressione temperatura-neve

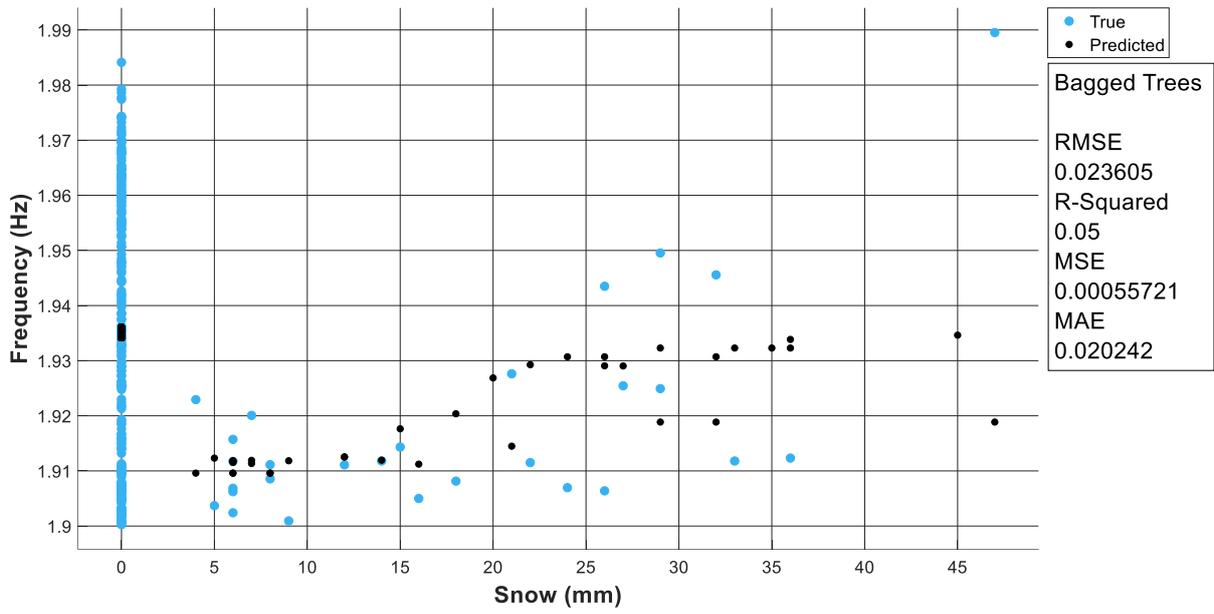


Figura 110 Modello di regressione frequenza 1-neve

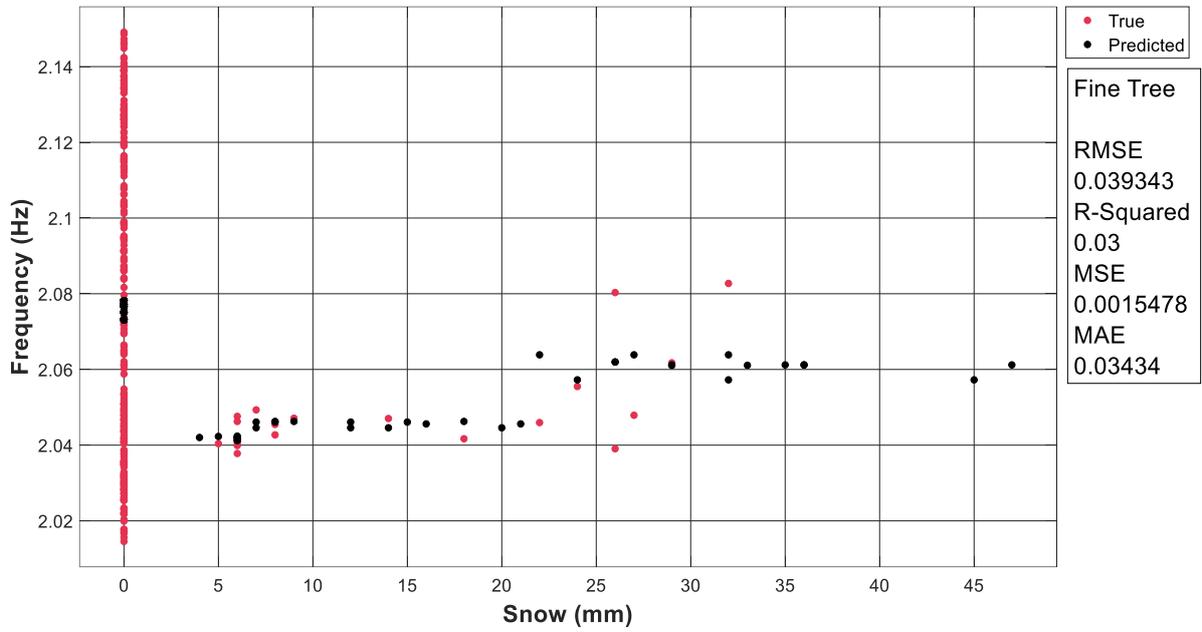


Figura 111 Modello di regressione frequenza 2-neve

5.3.2.3 Temperatura massima giornaliera

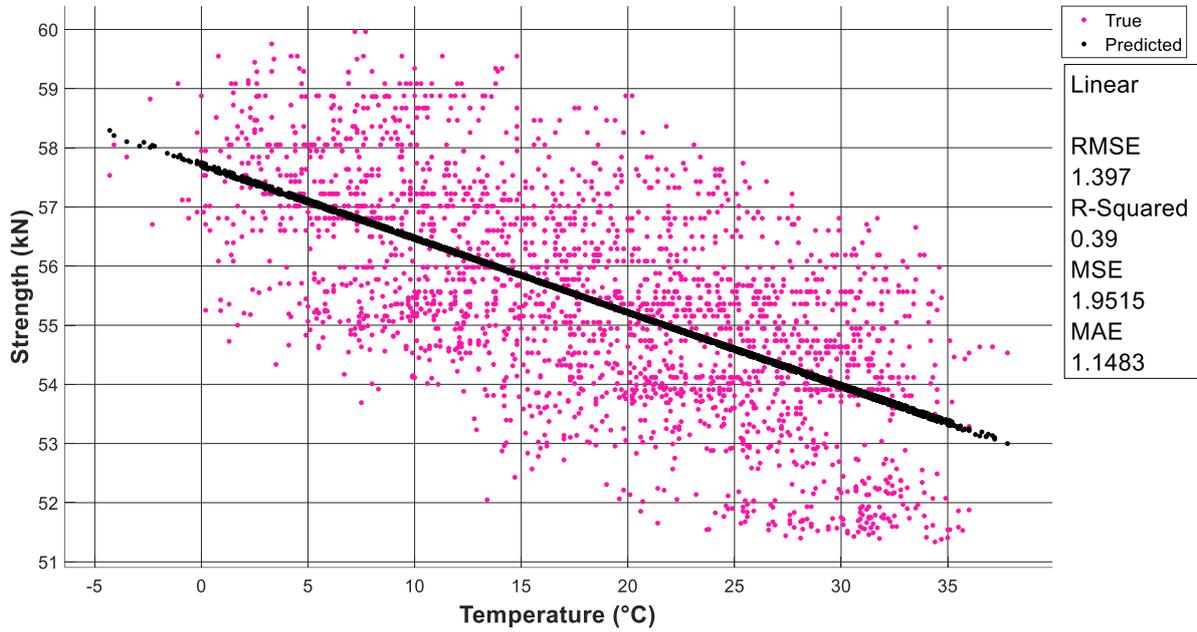


Figura 112 Modello di regressione forza nelle barre-temperatura massima giornaliera

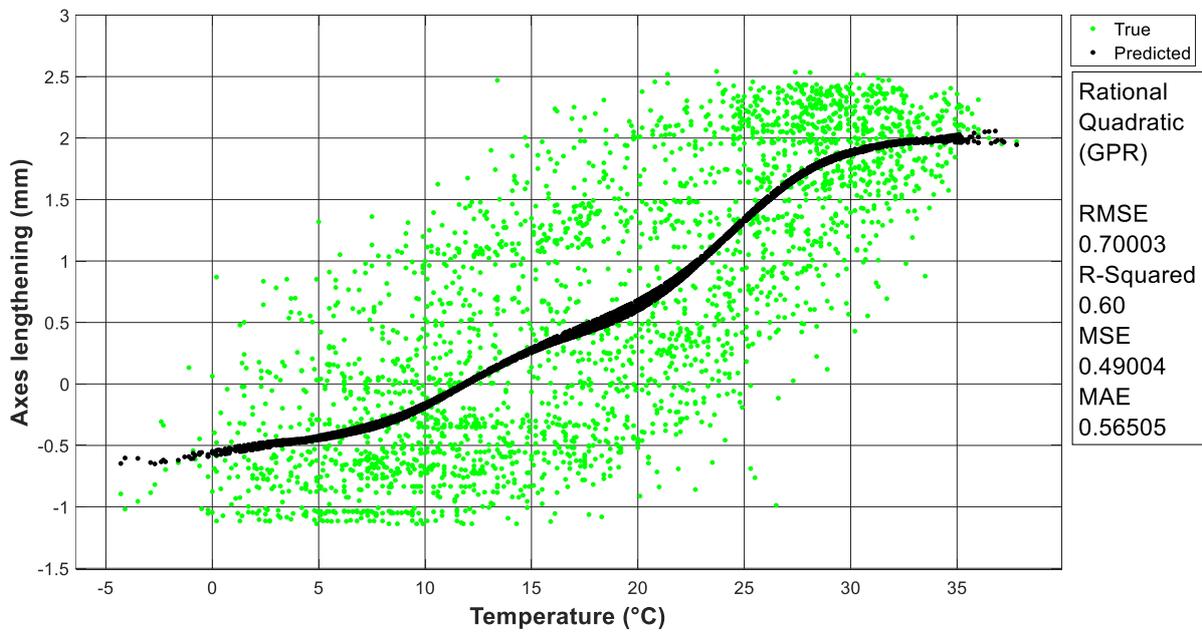


Figura 113 Modello di regressione convergenza asse minore-temperatura massima giornaliera

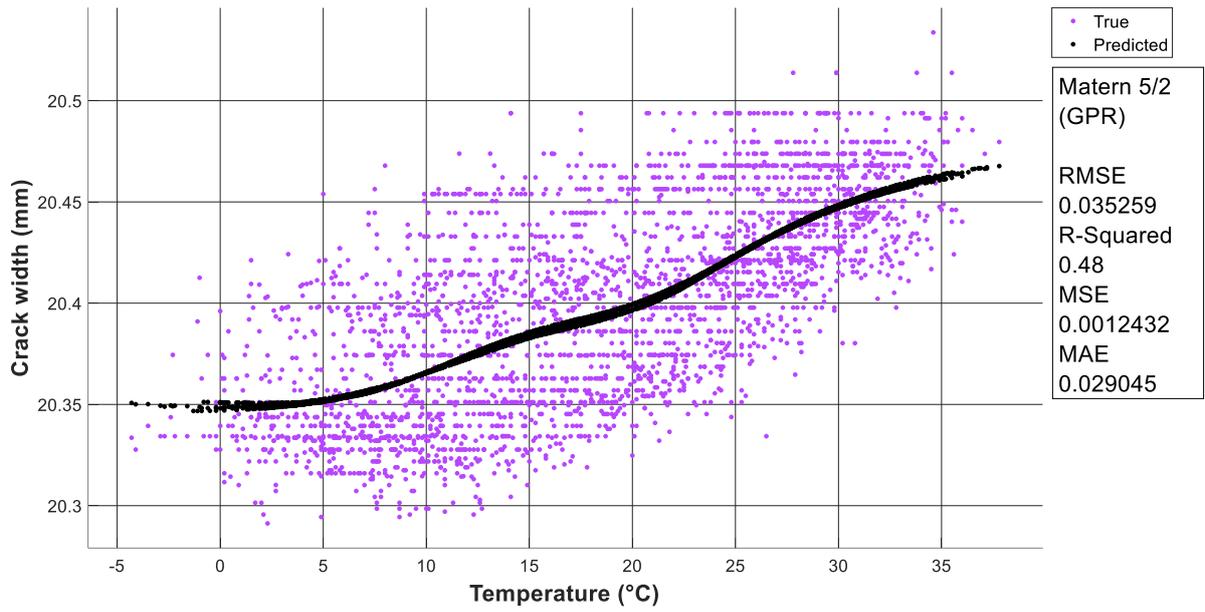


Figura 114 Modello di regressione ampiezza della fessura-temperatura massima giornaliera

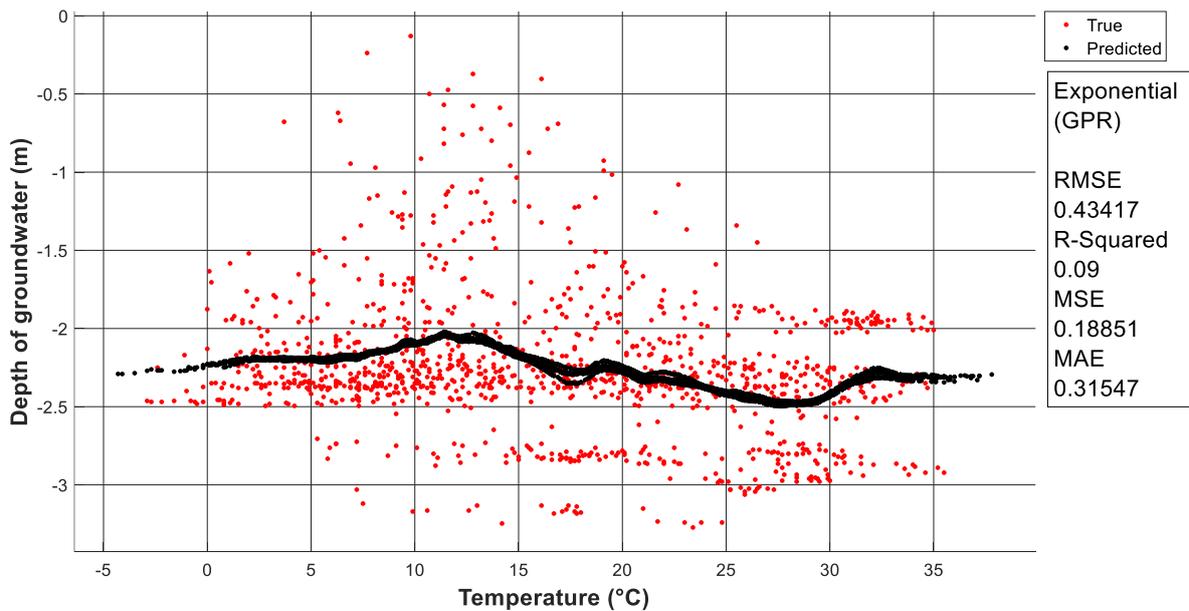


Figura 115 Modello di regressione profondità di falda-temperatura massima giornaliera

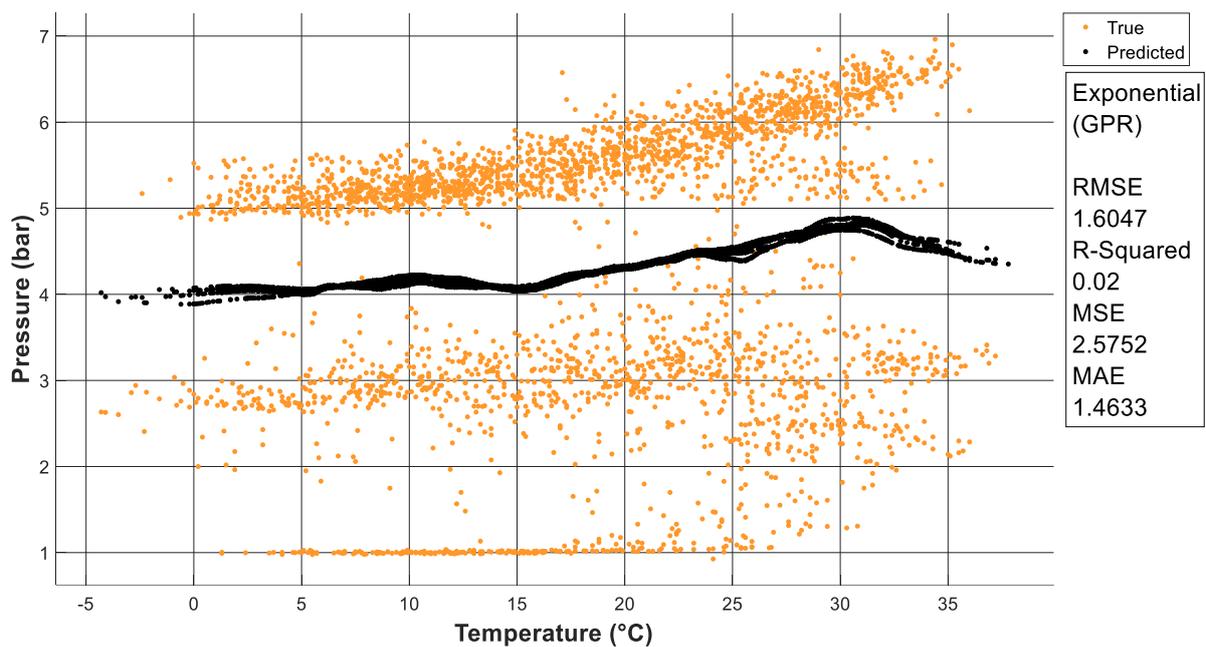


Figura 116 Modello di regressione pressione nelle barre-temperatura massima giornaliera

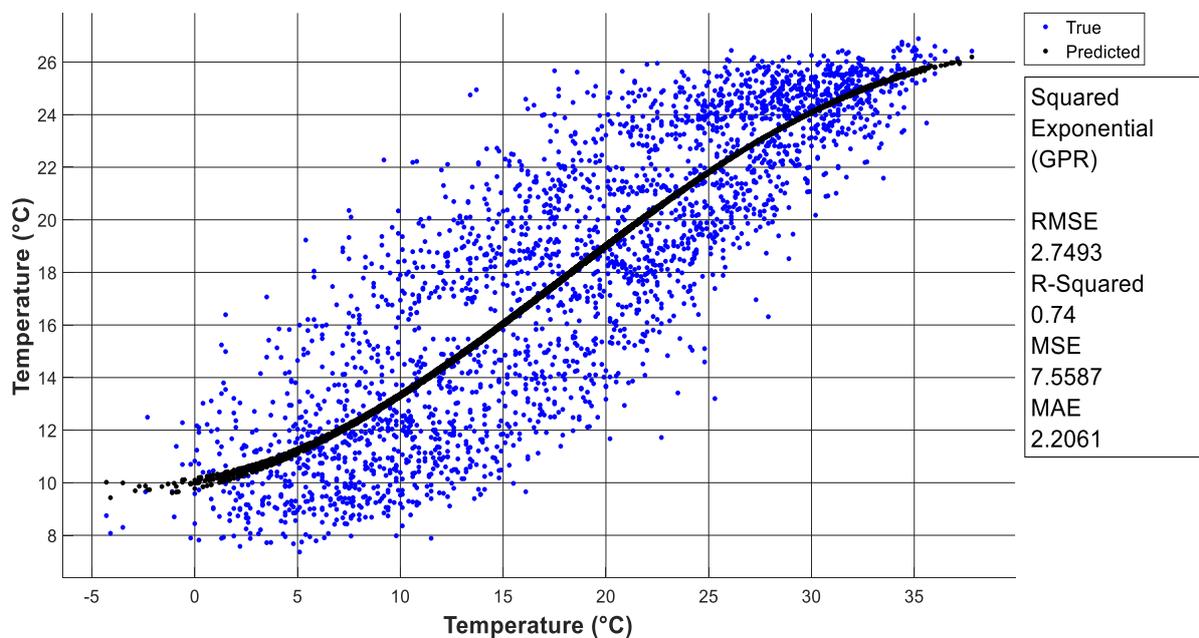


Figura 117 Modello di regressione temperatura interna-temperatura massima giornaliera

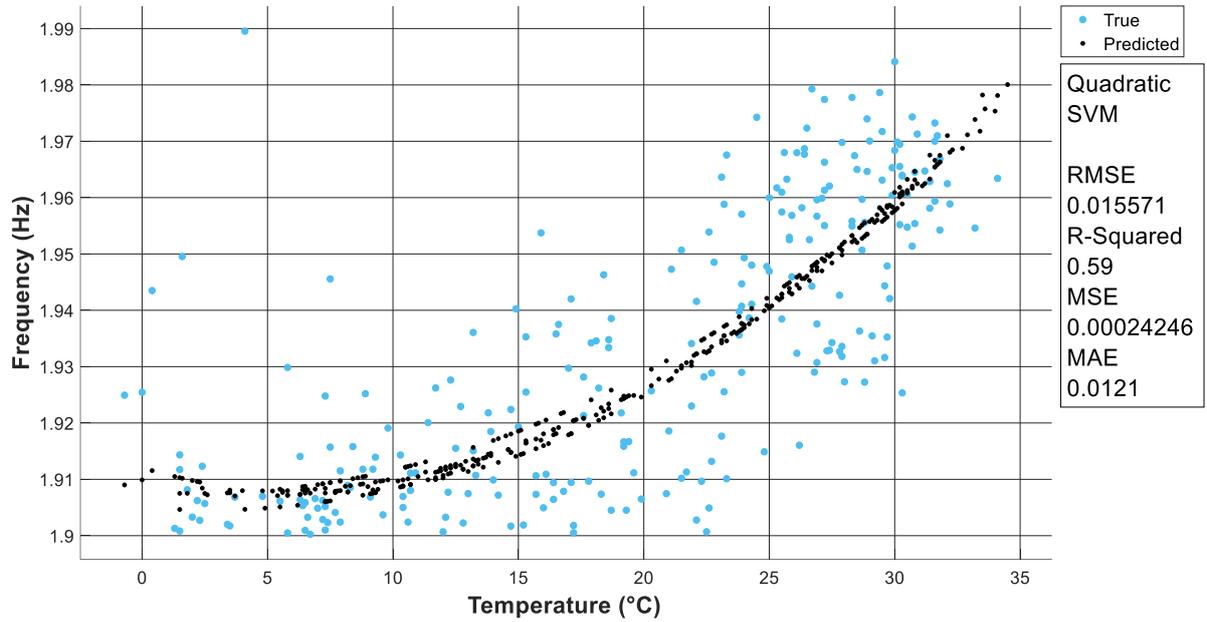


Figura 118 Modello di regressione frequenza 1-temperatura massima giornaliera

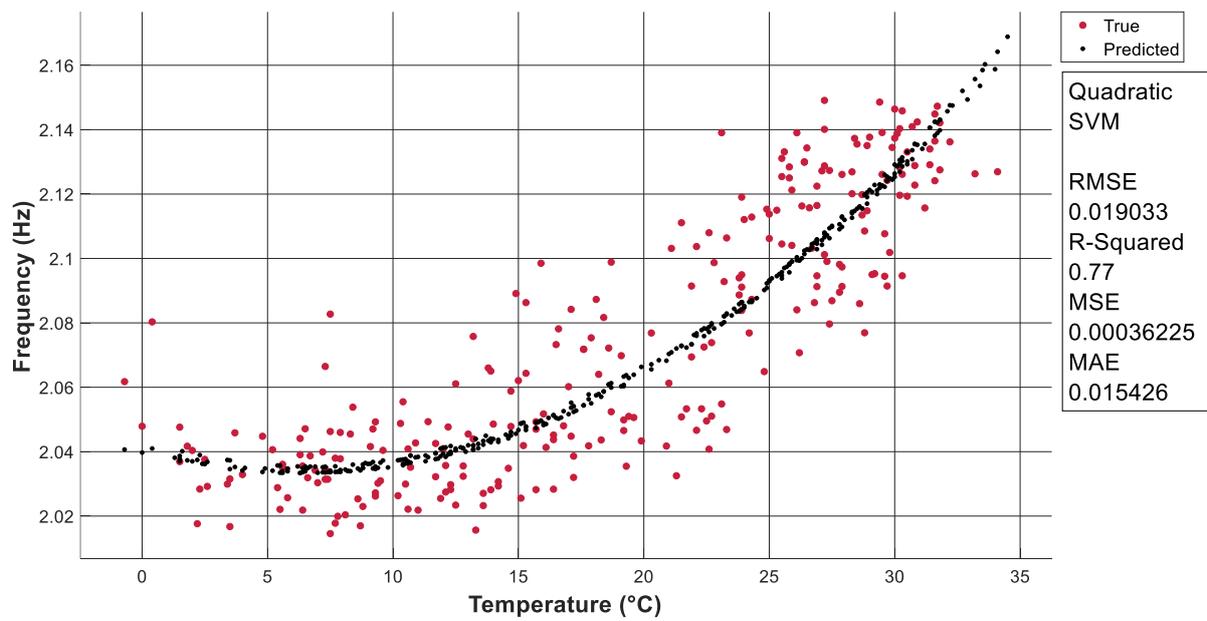


Figura 119 Modello di regressione frequenza 2-temperatura massima giornaliera

5.3.2.3 Temperatura minima giornaliera

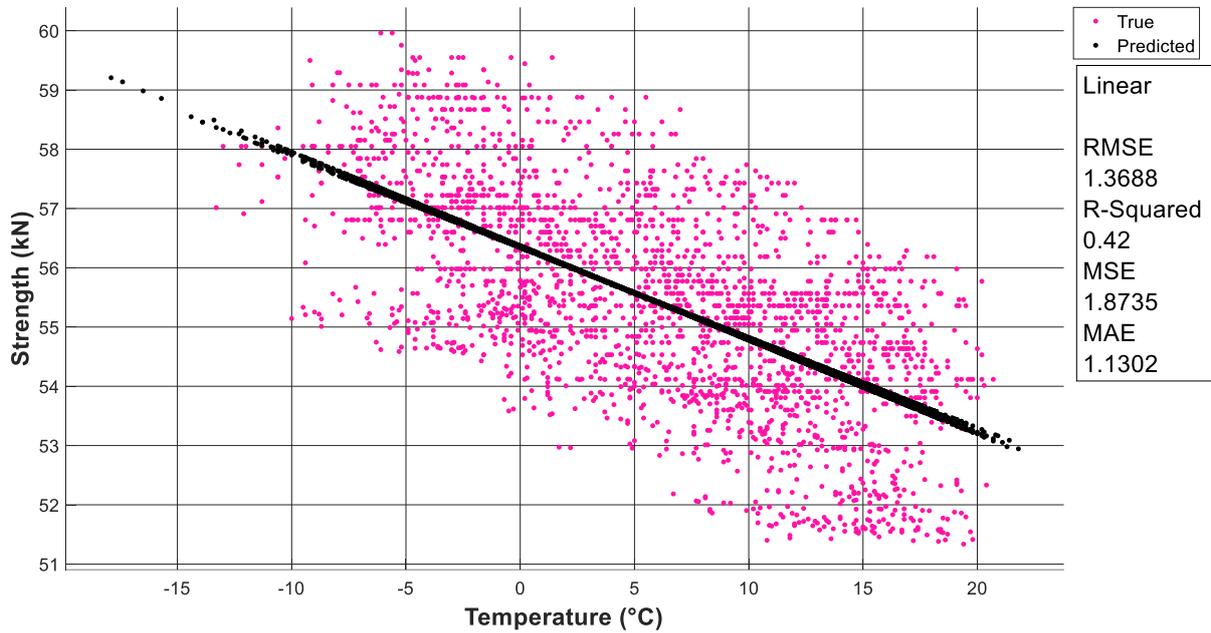


Figura 120 Modello di regressione forza nelle barre-temperatura minima giornaliera

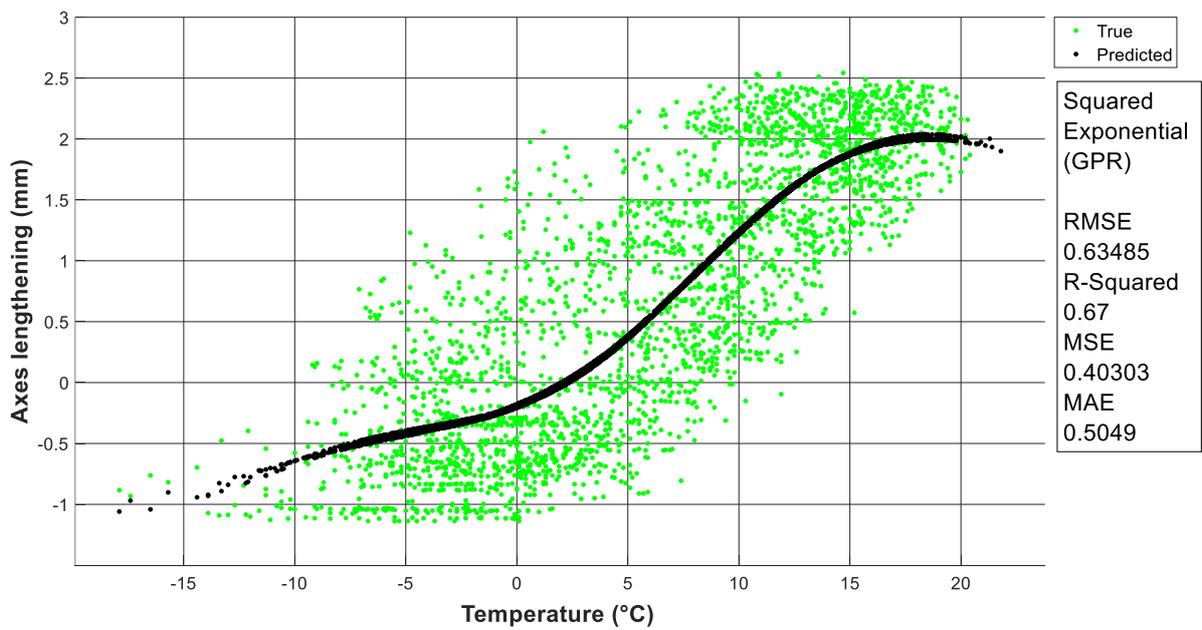


Figura 121 Modello di regressione convergenza asse minore-temperatura minima giornaliera

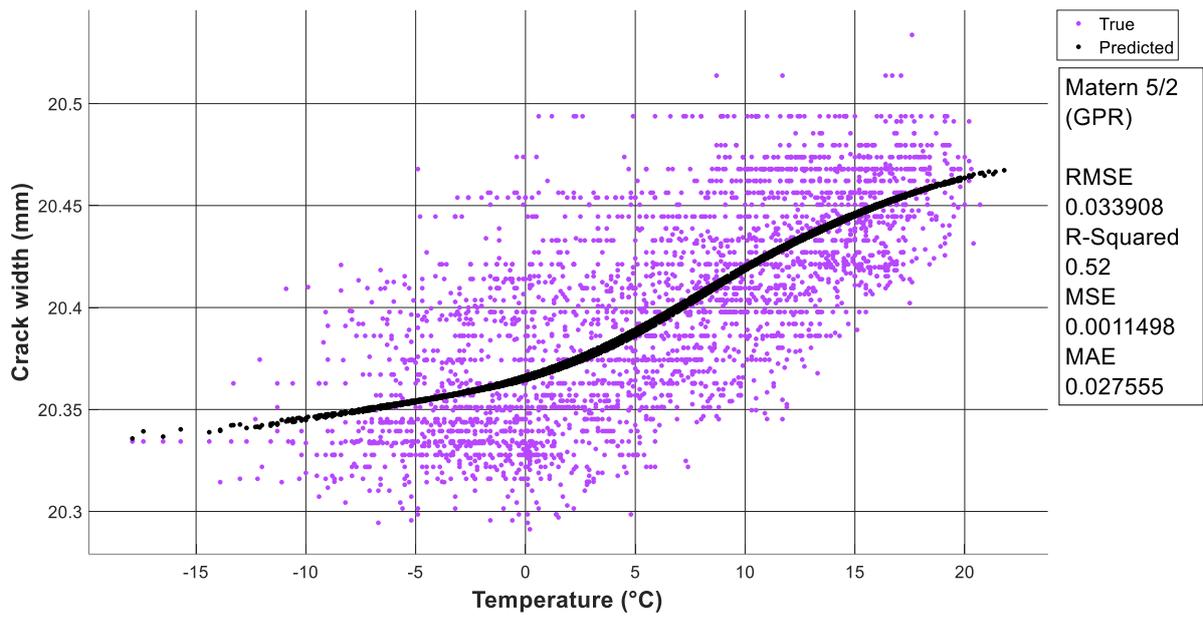


Figura 122 Modello di regressione apertura fessura-temperatura minima giornaliera

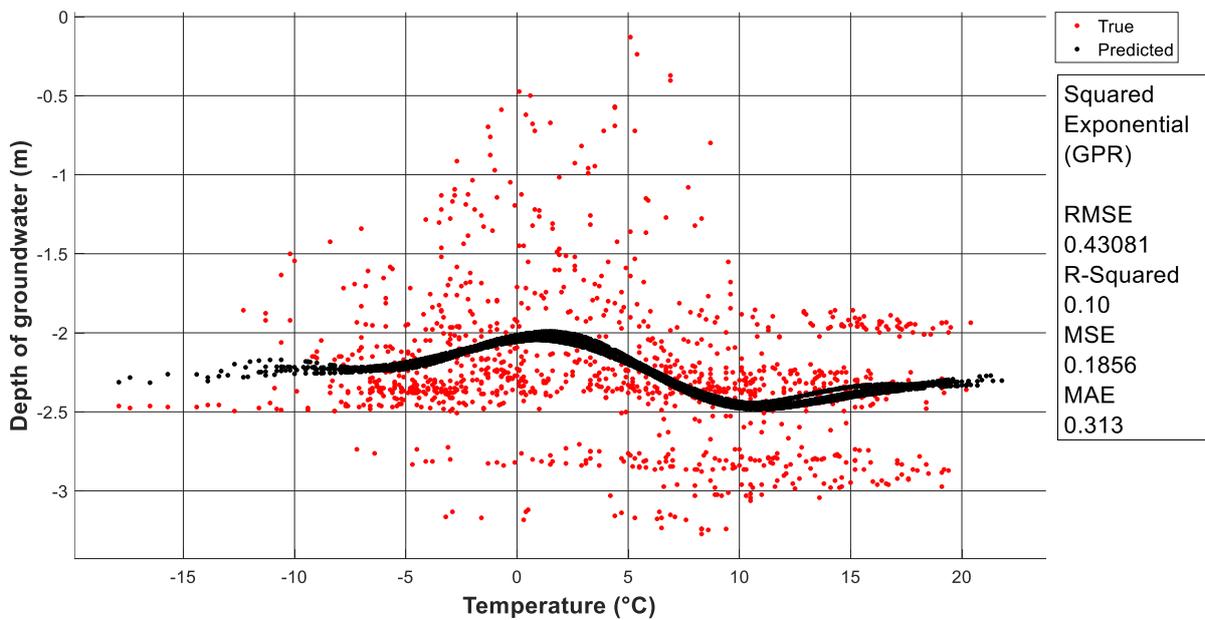


Figura 123 Modello di regressione profondità di falda-temperatura minima giornaliera

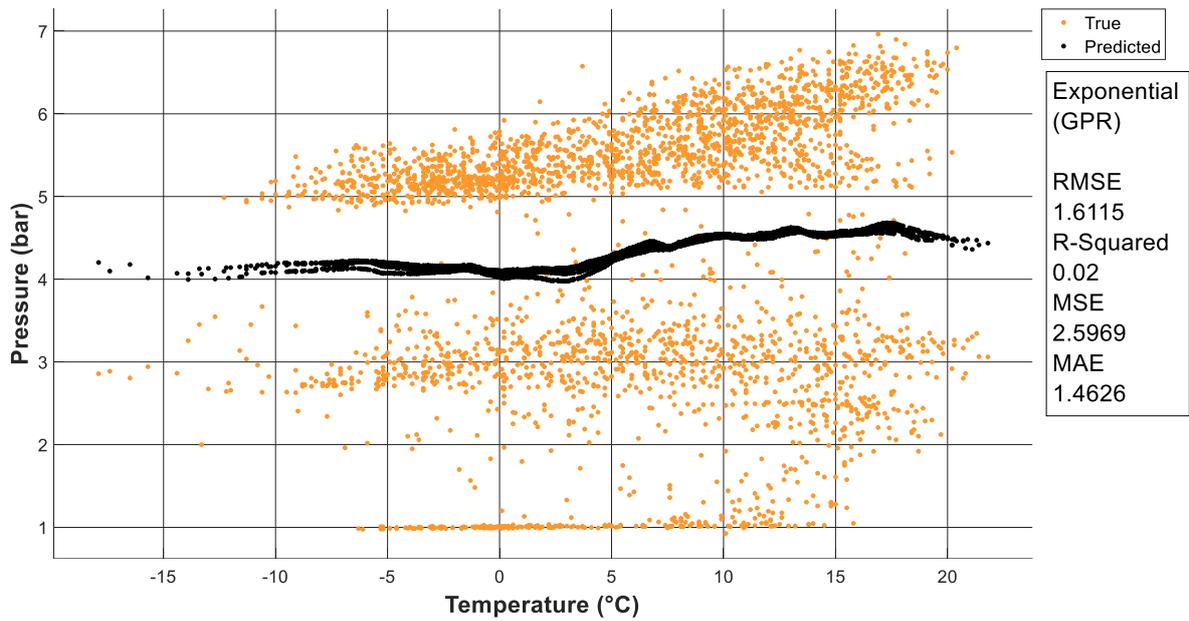


Figura 124 Modello di regressione pressione nella muratura-temperatura minima giornaliera

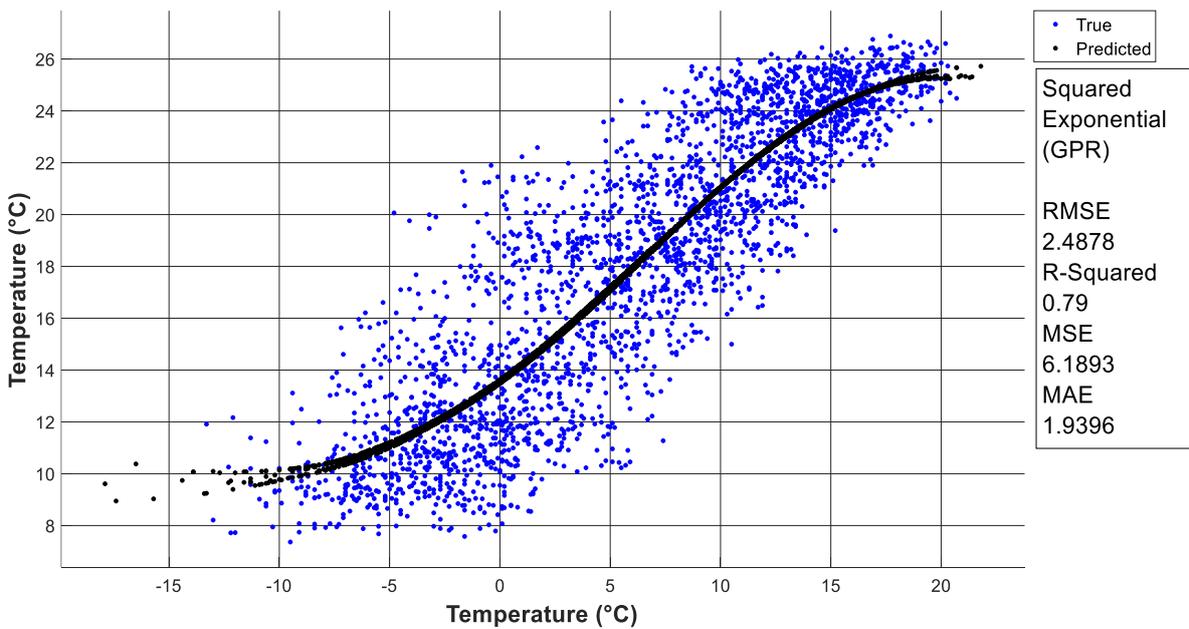


Figura 125 Modello di regressione termometro-temperatura minima giornaliera

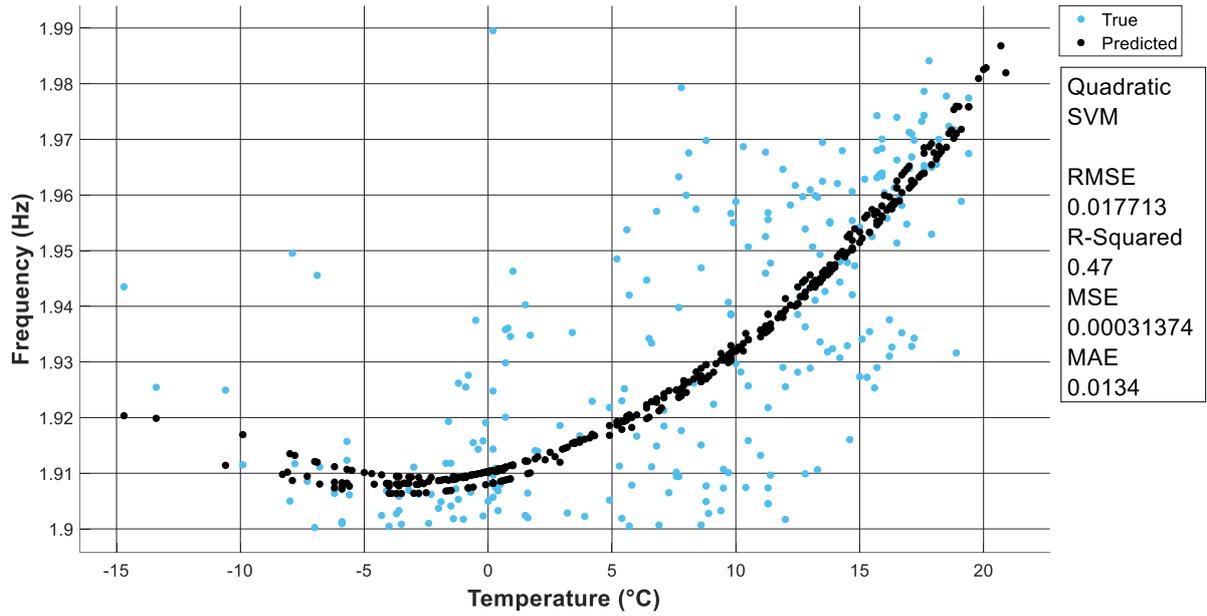


Figura 126 Modello di regressione frequenza 1-temperatura minima giornaliera

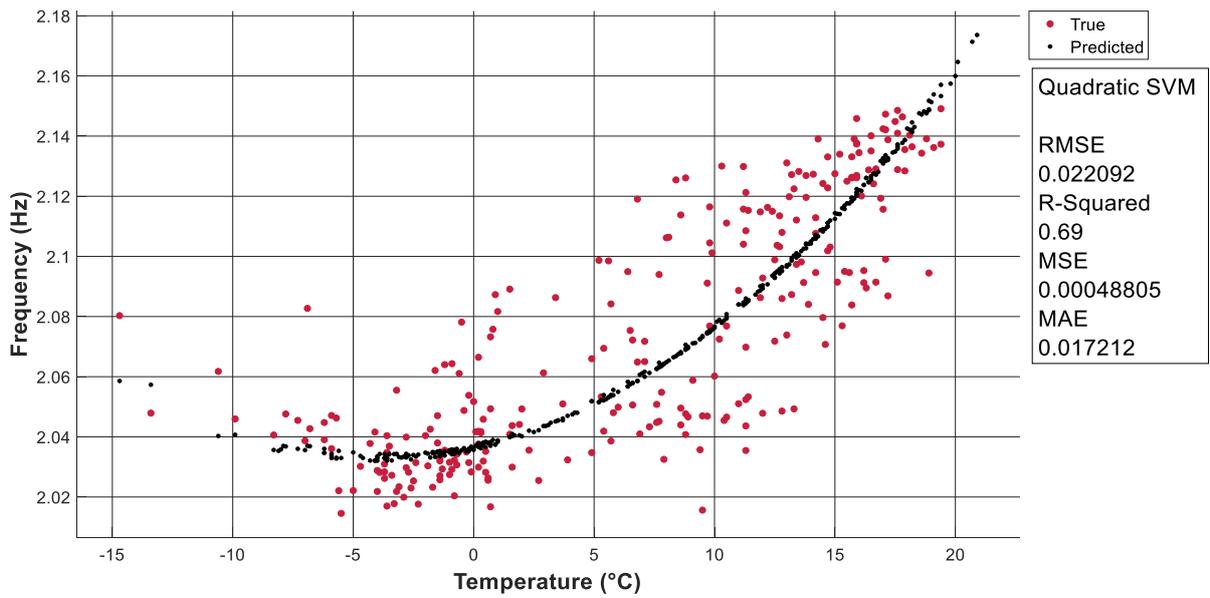


Figura 127 Modello di regressione frequenza 2-temperatura minima giornaliera

5.3.2.7 Temperatura media giornaliera

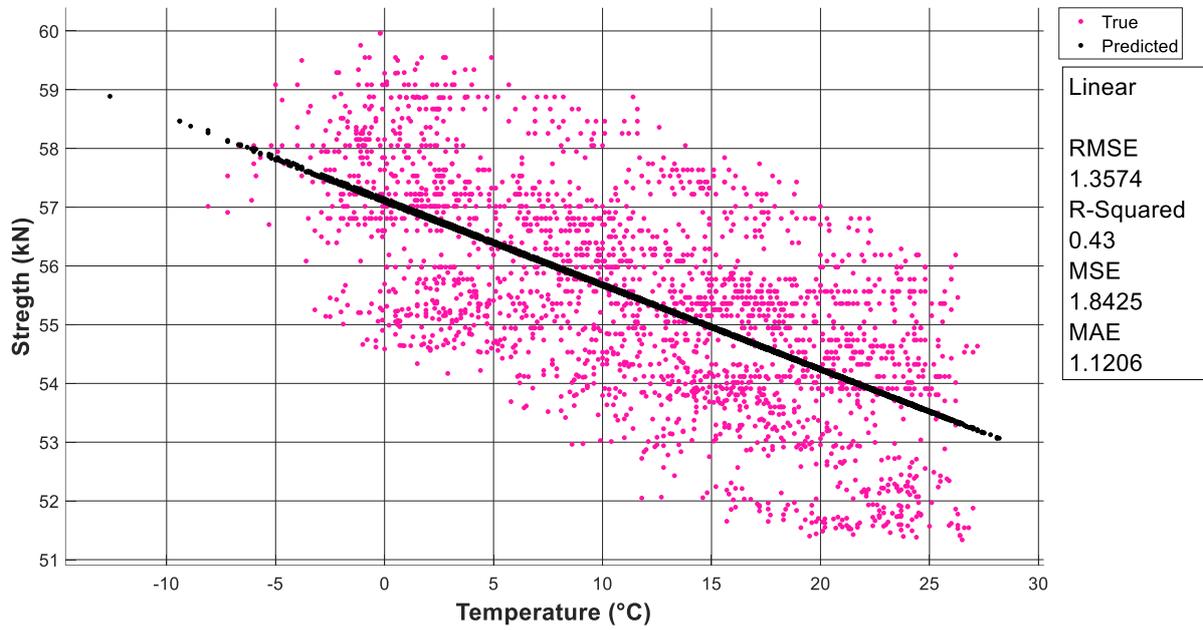


Figura 128 Modello di regressione forza nelle barre-temperatura media giornaliera

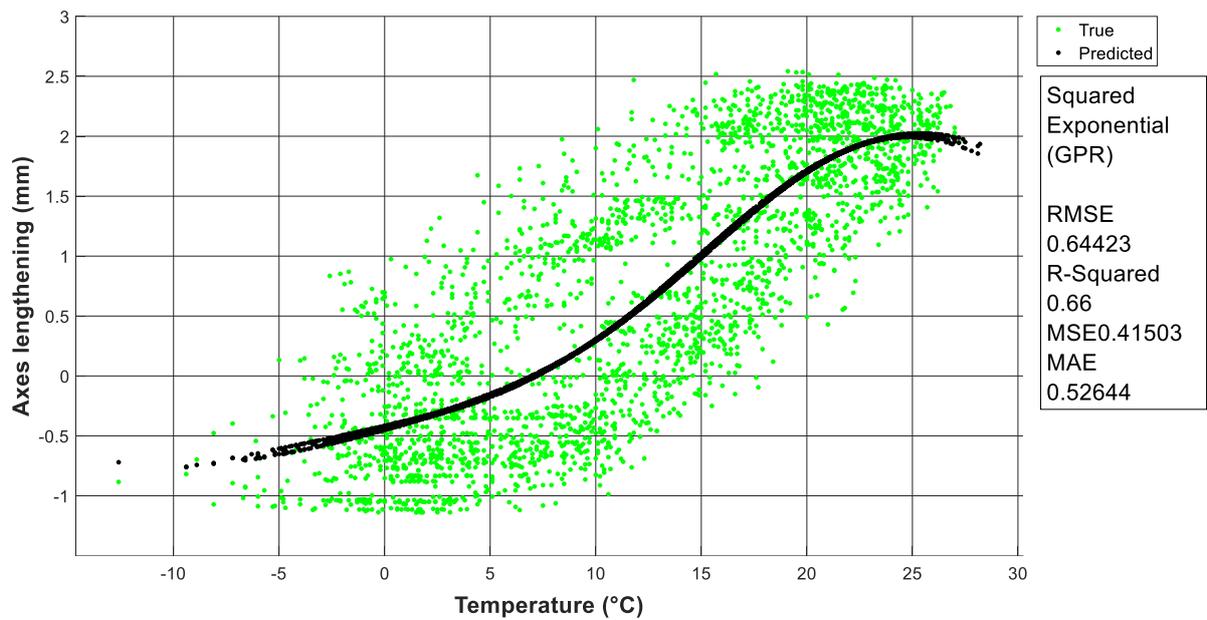


Figura 129 Modello di regressione convergenza asse minore-temperatura media giornaliera

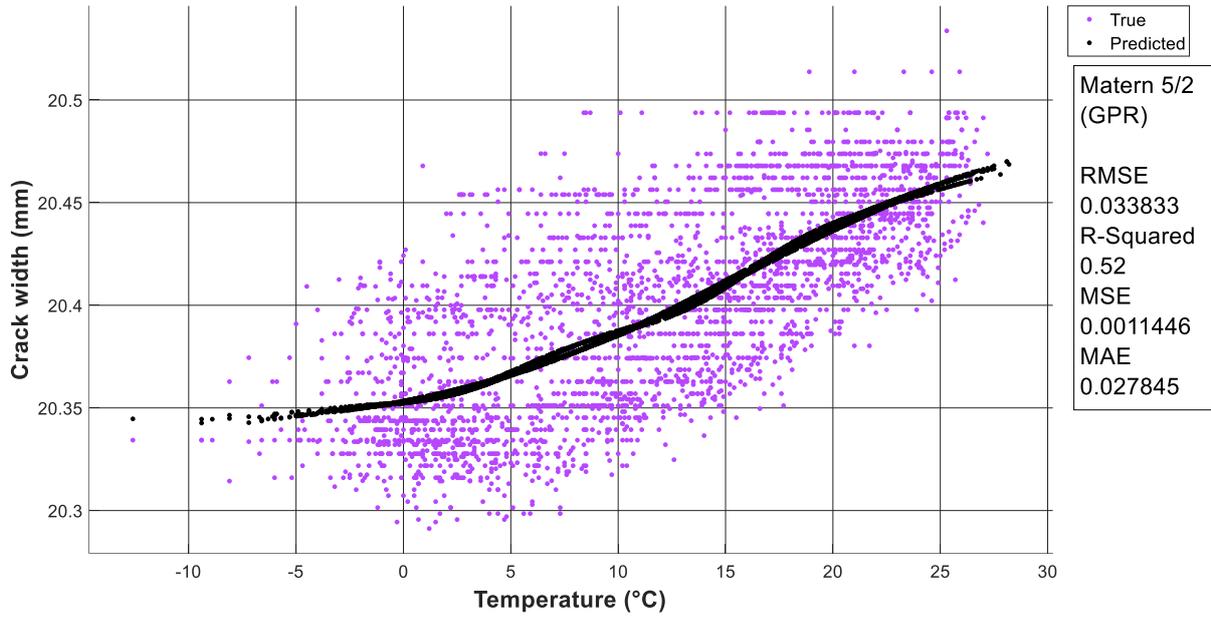


Figura 130 Modello di regressione apertura fessure-temperatura media giornaliera

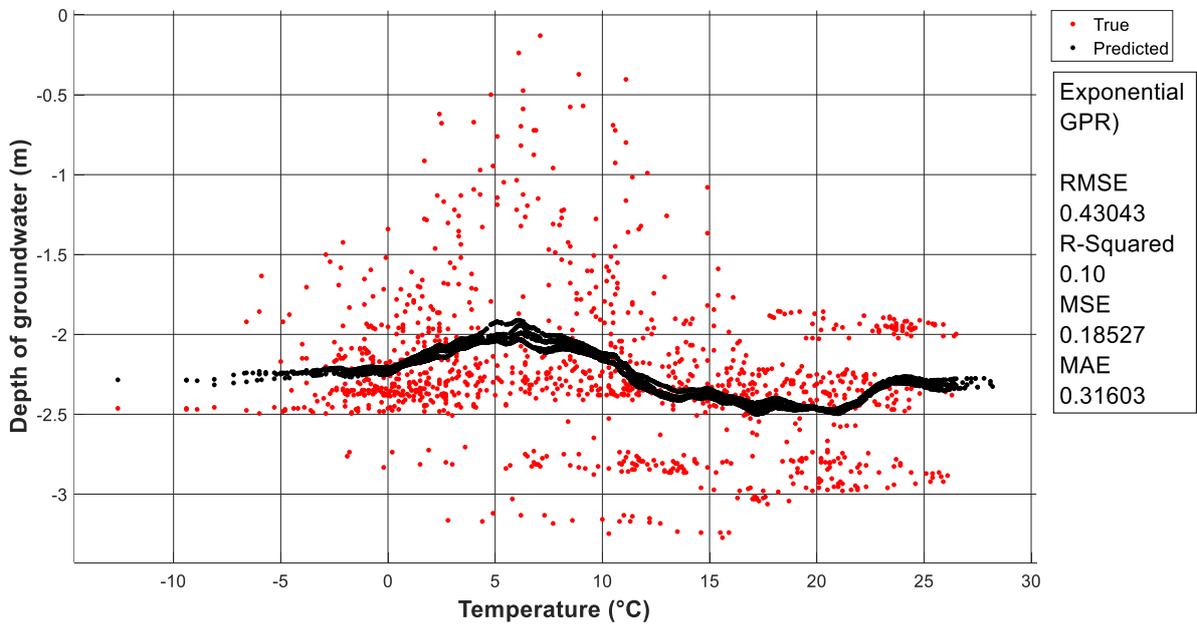


Figura 131 Modello di regressione profondità di falda-temperatura media giornaliera

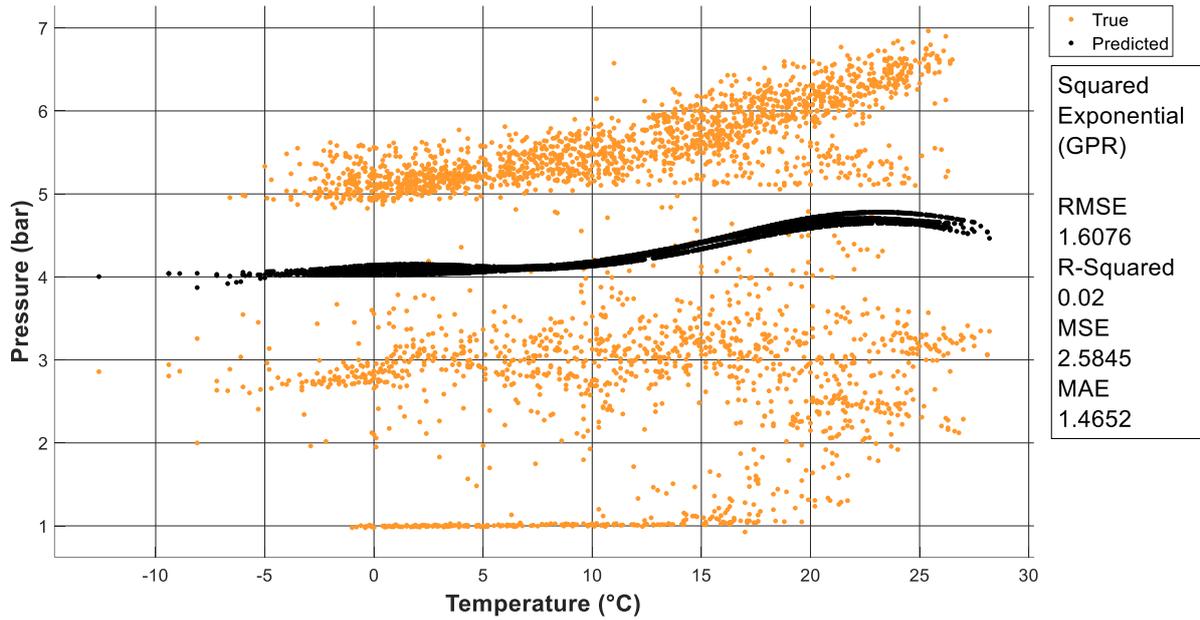


Figura 132 Modello di regressione pressione muratura-temperatura media giornaliera

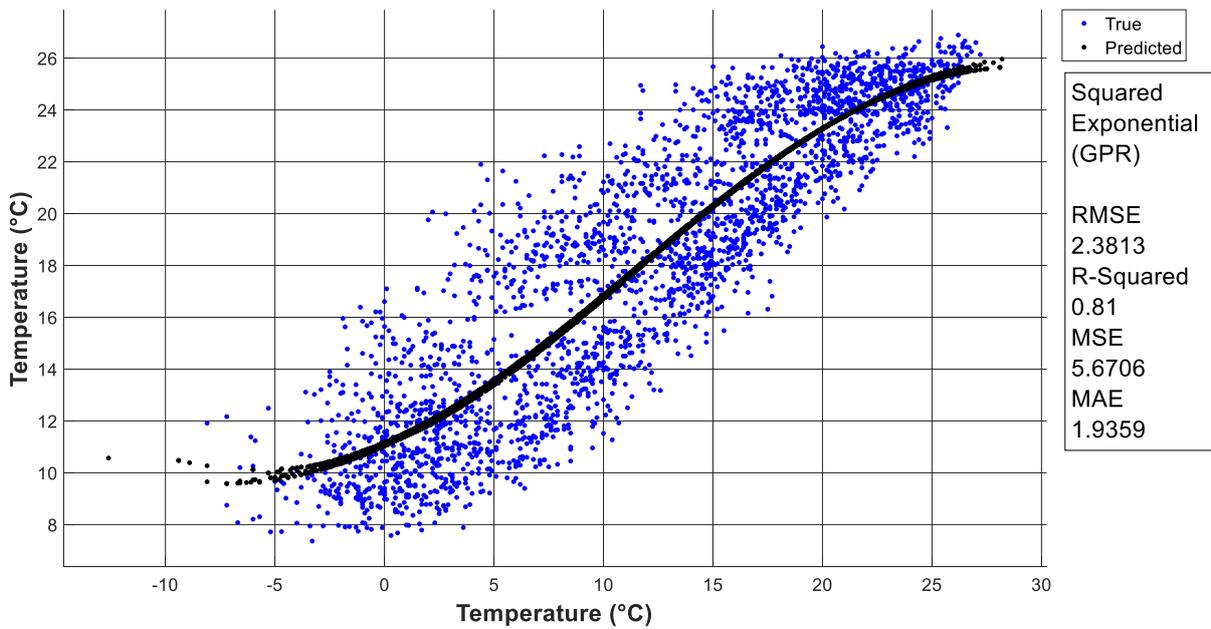


Figura 133 Modello di regressione temperatura interna-temperatura media giornaliera

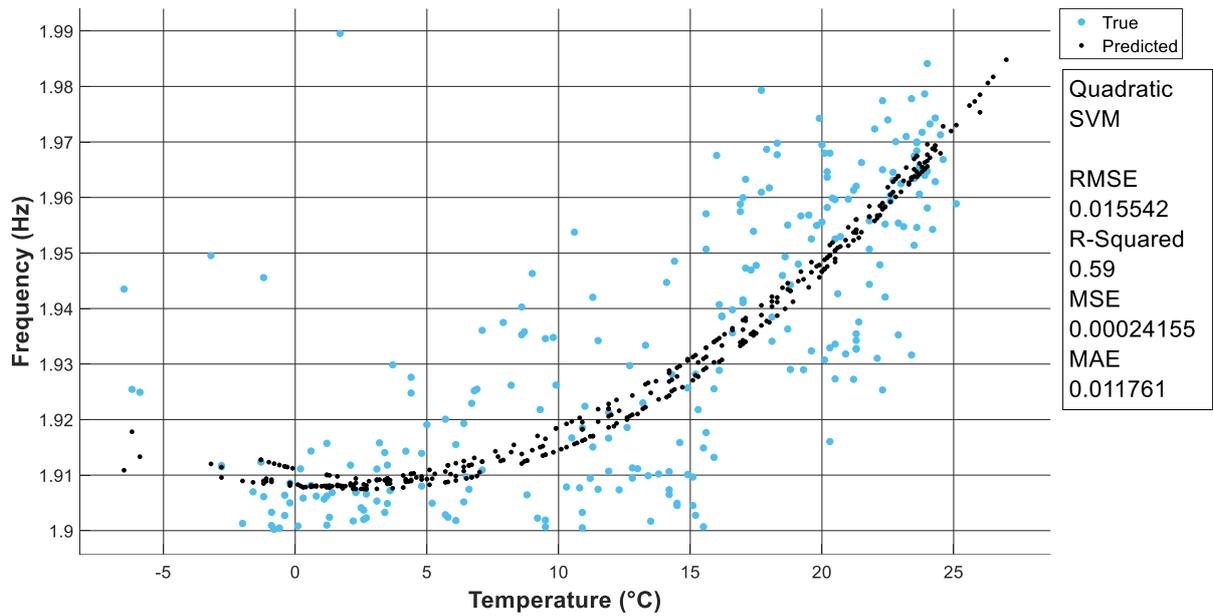


Figura 134 Modello di regressione frequenza 1-temperatura media giornaliera

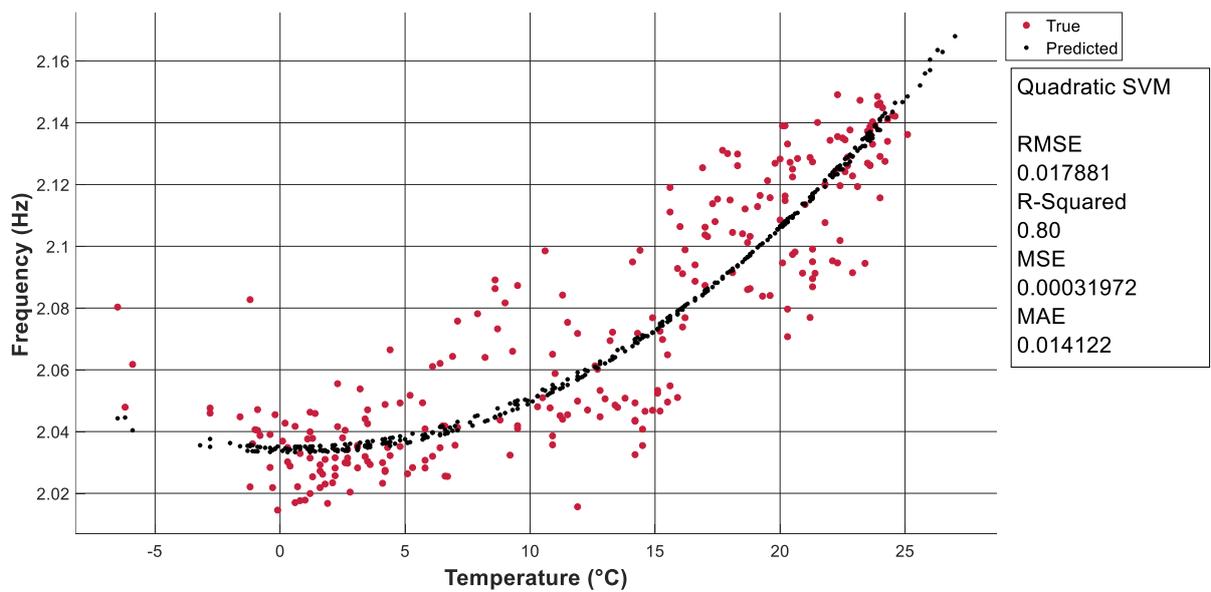


Figura 135 Modello di regressione frequenza 2-temperatura media giornaliera

Gli indici calcolati ci permettono di valutare se è presente o meno una correlazione tra le variabili prese in considerazione, confermando quanto è possibile apprendere già visivamente osservando i trend dei plot precedenti.

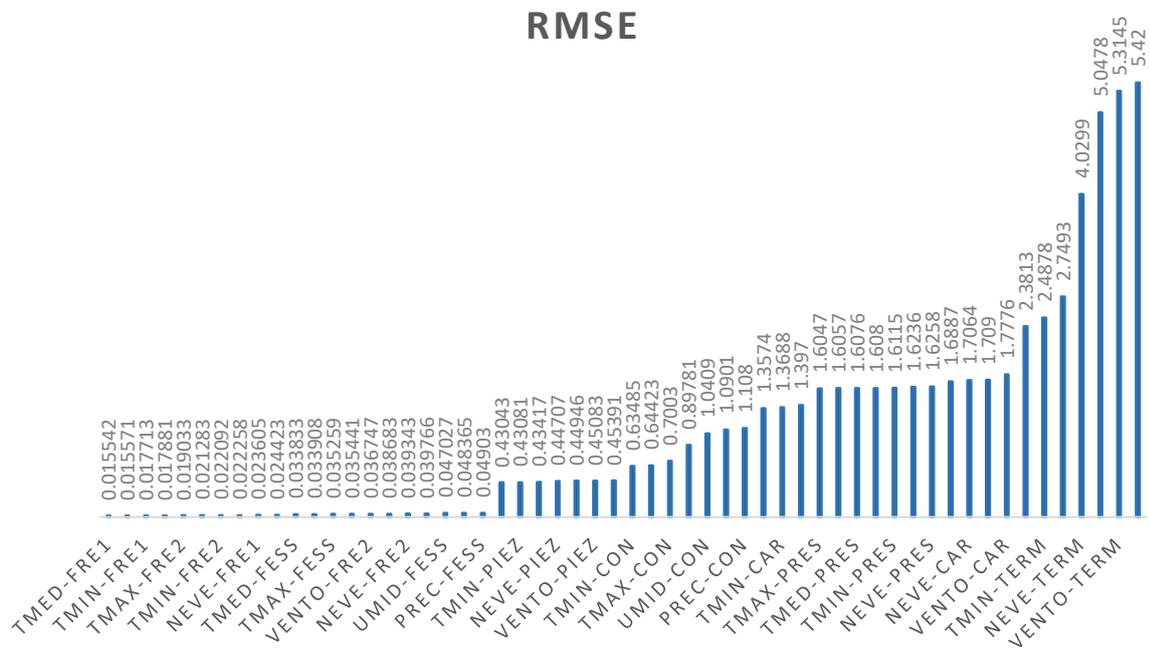


Figura 136 Andamento indice RMSE prendendo in considerazione le correlazioni tra variabili

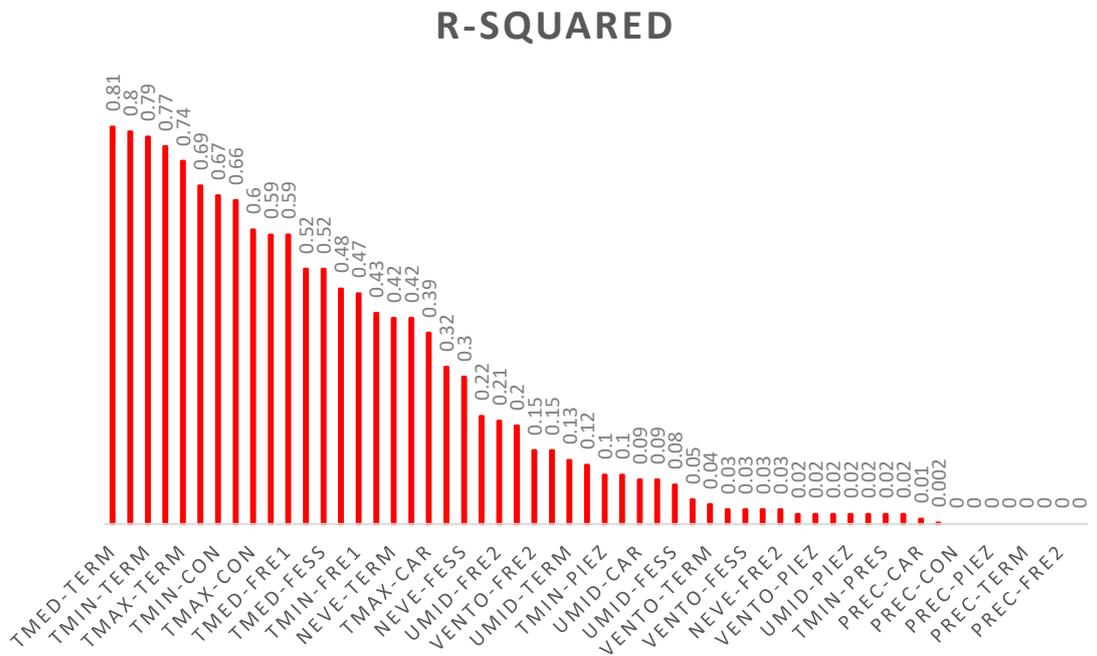


Figura 137 Andamento indice R-Squared prendendo in considerazione le correlazioni tra variabili

Le analisi di dati fin qui eseguite portano alla conclusione che l'agente esterno che sembra avere maggiore influenza sul comportamento strutturale del Santuario di Vicoforte è la temperatura.

Come possiamo vedere infatti sembra non esserci una correlazione tra i dati statici e dinamici e gli agenti esterni quali l'azione del vento, l'umidità e la precipitazione, al contrario della temperatura e, in misura inferiore, della neve. Si ha ragione di credere che l'influenza della neve sia un effetto secondario, legato alla relazione esistente tra la presenza di neve e la temperatura.

Come possiamo vedere dalle immagini, quasi tutti i set di dati, siano essi statici o dinamici, sembrano avere un chiaro trend quando messi in relazione alle temperature ambientali fornite da ARPA Piemonte.

I dati dei piezometri sembrano non avere alcun tipo di correlazione con i dati ambientali, neanche con i dati di altezza di precipitazione, al contrario di quanto si potesse pensare ipotizzando un innalzamento della falda a causa delle acque di pioggia. Questo risultato ha reso difficoltoso anche lo studio dell'influenza del terreno sulla struttura, come vedremo più avanti.

L'analisi dei dati di pressione registrati dalle celle di pressione all'interno della muratura in funzione della temperatura ha portato dei risultati di difficile interpretazione. Infatti, come possiamo vedere nelle figure, i dati registrati dal 2004 al 2009 sembrano mantenersi costanti o presentano un leggero incremento della pressione all'aumentare della temperatura, quasi con andamento stagionale, invece dal 2009 sembrano non seguire più questo trend. Non riusciamo quindi a definire se questo comportamento sia dovuto a un qualche tipo di fenomeno sopraggiunto nella muratura nel 2009 oppure ad un mal funzionamento delle celle di pressione.

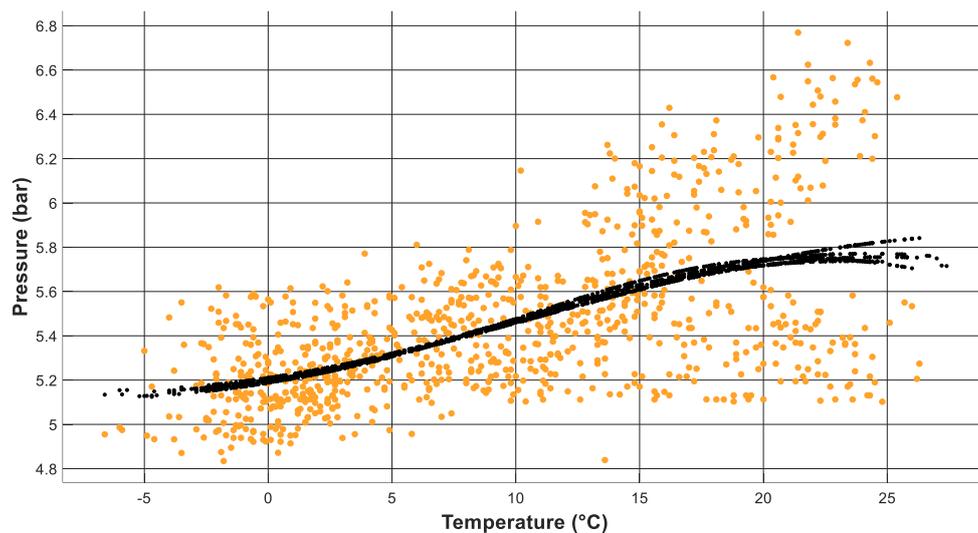


Figura 138 Trend dati celle di pressione-temperatura media giornaliera 2004-2009

Un andamento alquanto chiaro è emerso dall'analisi dei dati di convergenza degli assi in funzione della temperatura. Entrambi gli assi della cupola ovale, il maggiore lungo 37.15 m ed il minore 24.80 m, sembrano allungarsi all'aumentare della temperatura esterna. Questo fenomeno sembrerebbe descrivere una dilatazione complessiva della muratura e quindi un allontanamento delle pareti opposte.

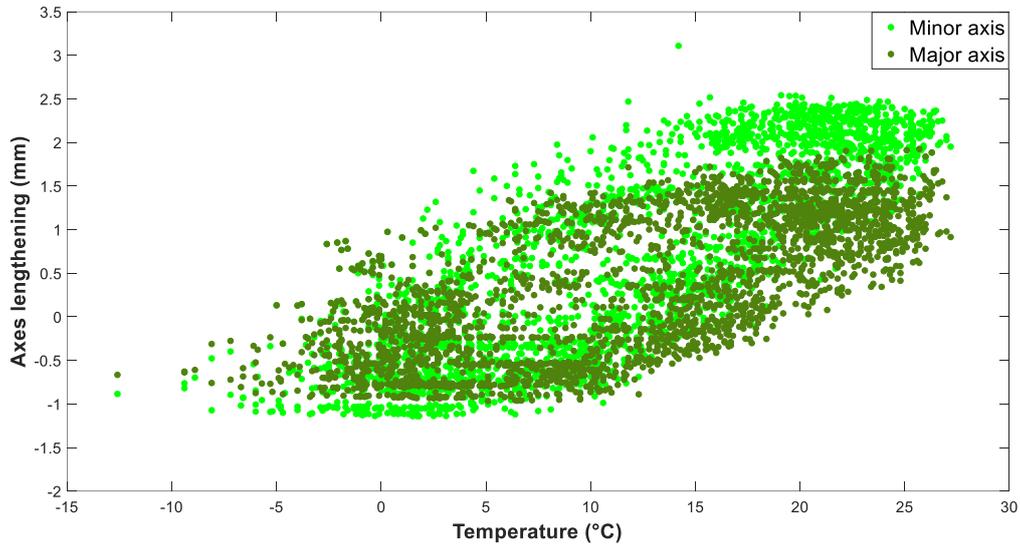


Figura 139 Allungamento degli assi della cupola ovale in funzione della temperatura

Sono però i dati registrati da celle di carico e fessurimetri che, tra i dati statici, riescono a fornirci maggiori informazioni sul comportamento strutturale del Santuario di Vicoforte.

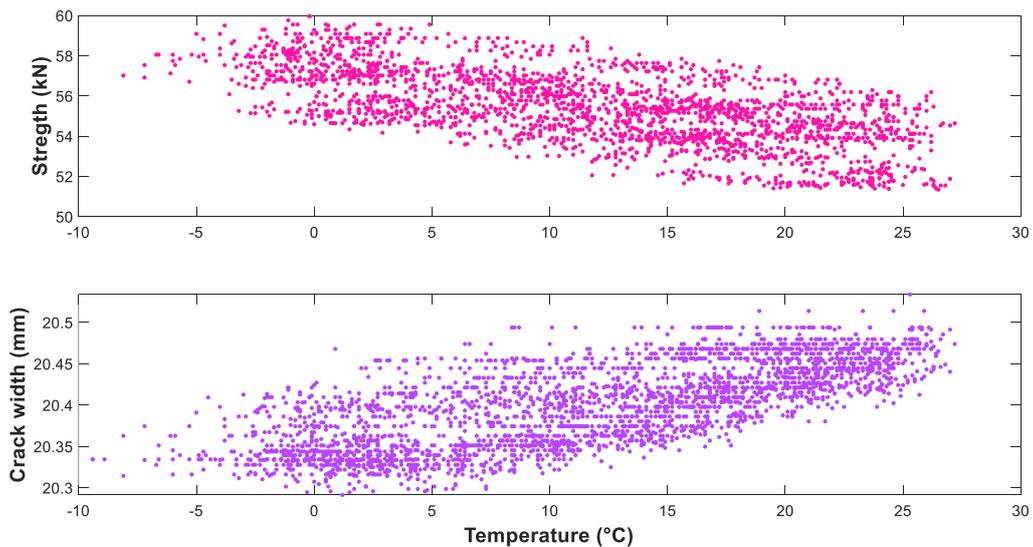


Figura 140 Forza misurata dalle celle di carico e apertura delle fessure in funzione della temperatura

Come possiamo vedere dalle immagini, i sensori del sistema di monitoraggio statico hanno registrato un decremento della tensione nelle barre d'acciaio che costituiscono il sistema di cerchiaggio della cupola. Questo sembra rispecchiare un indebolimento delle barre che risentono dell'aumento della temperatura ammorbidendosi. A questo comportamento delle barre corrisponde invece un comportamento opposto delle fessure, che all'incremento della temperatura si aprono. Questi due trend sembrano essere perfettamente in linea tra di loro e si ipotizza possano quindi essere legati allo stesso fenomeno : all'aumentare della temperatura le barre perdono tensione, il sistema di cerchiaggio diventa meno efficace e le fessure si aprono.

Per ultimo tra i dati statici analizziamo i dati dei termometri, i quali risultano in correlazione con la temperatura esterna, anche se non perfettamente coincidente con questa a causa dell'inerzia termica della muratura. La temperatura sarà fondamentale per migliorare il processo di identificazione del danno della struttura, come vedremo nel capitolo 6.

Passando ad analizzare i parametri dinamici del Santuario la temperatura continua ad essere l'unico agente esterno che sembra influenzarne il comportamento dell'edificio. Osservando il trend delle frequenze in funzione delle temperature si è notato un comportamento simile a quello del volume dell'acqua in funzione della temperatura, anche se shiftato di circa 8°C . Infatti mentre il volume dell'acqua raggiunge il suo valore minimo in corrispondenza di 4°C , riscontriamo le frequenze più basse, che corrispondono ad una minore rigidità della struttura, in corrispondenza di circa -4°C .

Si è ipotizzato quindi che questo comportamento della struttura possa essere legato ad uno stato di coazione tra l'acqua e la muratura, che potrebbe spiegare questo particolare comportamento intorno allo 0°C . Lo shift è dovuto all'inerzia termica della temperatura, che fa sì che la temperatura interna della muratura risulti positiva compresa tra 0 e 4°C quando quella esterna è già scesa sotto lo zero.

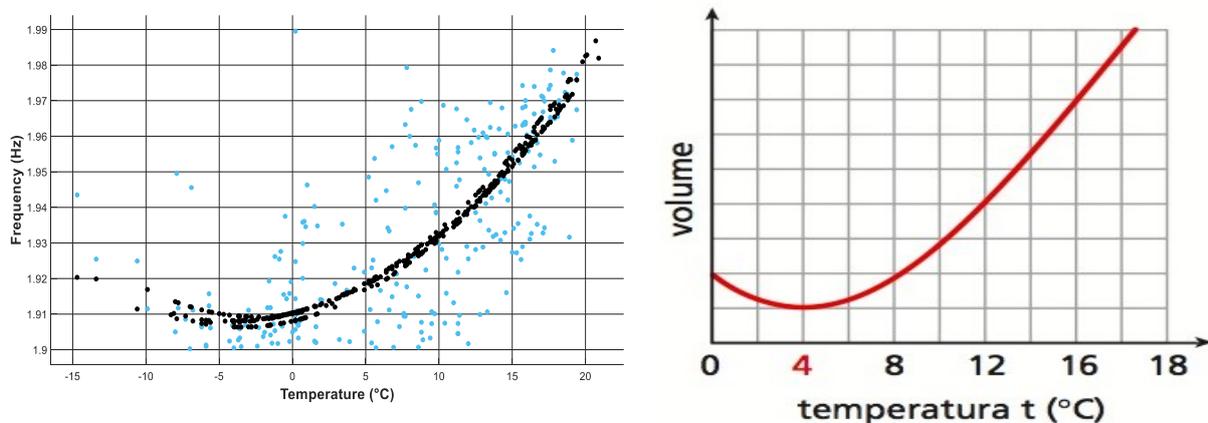


Figura 141 Andamento frequenza - temperatura esterna e andamento volume dell'acqua - temperatura a confronto

5.4 Influenza del terreno sulle frequenze

Un fattore che presumibilmente potrebbe avere un certo peso nel comportamento dinamico della struttura, soprattutto nei primi modi di vibrare, è il terreno su cui il Santuario di Vicoforte è stato eretto.

Uno dei problemi legati al Santuario, sorto già quando questo era ancora in fase di costruzione, è il cedimento delle fondazioni, che ha reso necessario la realizzazione di una serie di campagne volte ad indagare il terreno sottostante. Queste indagini hanno stabilito, come precedentemente illustrato nel capitolo 3, che il terreno sotto l'edificio è costituito da una base di marna su cui troviamo uno strato di limo argilloso di spessore variabile tra i 3 e i 9 m.

5.4.1 Approccio sperimentale

Un primo approccio di tipo sperimentale, volto ad identificare se e quanto il terreno incide sui parametri dinamici, si è basato sull'analisi dei vettori di deformazione corrispondenti ai primi modi di vibrare della struttura.

Partiamo dai risultati ottenuti dal processo di identificazione lineare dei segnali provenienti da tutti i dodici accelerometri posti a costituire il sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte. Il vettore degli spostamenti modali ottenuto dalle identificazioni dei segnali è costituito dagli spostamenti dei dodici gradi di libertà della struttura :

- 3 gradi di libertà della struttura fuori terra in direzione X,
- 5 gradi di libertà della struttura fuori terra in direzione Y,
- 1 grado di libertà della struttura fuori terra in direzione Z,
- 3 gradi di libertà della cripta (X,Y e Z).

Definiamo quindi il vettore degli spostamenti in direzione X (Φ_x), costituito dai 3 gradi di libertà della struttura a cui si aggiunge quello della cripta (φ_{cx}), e il vettore degli spostamenti in direzione Y (Φ_y), , costituito dai 5 gradi di libertà della struttura a cui si aggiunge quello della cripta (φ_{cy}).

Possiamo allora definire un indice per ogni direzione che sia in grado di fornirci un'idea di quanto lo spostamento della struttura nelle due direzioni sia dovuto ad uno spostamento del terreno:

$$IND_X = \frac{|\varphi_{cx}|}{|\varphi_{cx}| + \sigma(\Phi_x)}$$

$$IND_Y = \frac{|\varphi_{cy}|}{|\varphi_{cy}| + \sigma(\Phi_y)}$$

Dove σ indica la varianza del vettore degli spostamenti.

L'indice così calcolato è compreso tra 0 e 1. Un valore prossimo ad 1 indica che la varianza del vettore degli spostamenti è bassa perciò la struttura si muove quasi di moto rigido dovuto allo spostamento del suolo, al contrario un valore vicino allo zero indica una grande varianza del vettore spostamento indicando che gli spostamenti sono dovuti alla deformazione della struttura e non al moto del terreno. Si è preso in considerazione i primi due modi di vibrare della struttura e si è calcolato il valore di IND_Y per il primo modo, trattandosi del primo modo traslazionale in Y, e IND_X per il secondo modo, trattandosi del primo modo traslazionale in X.

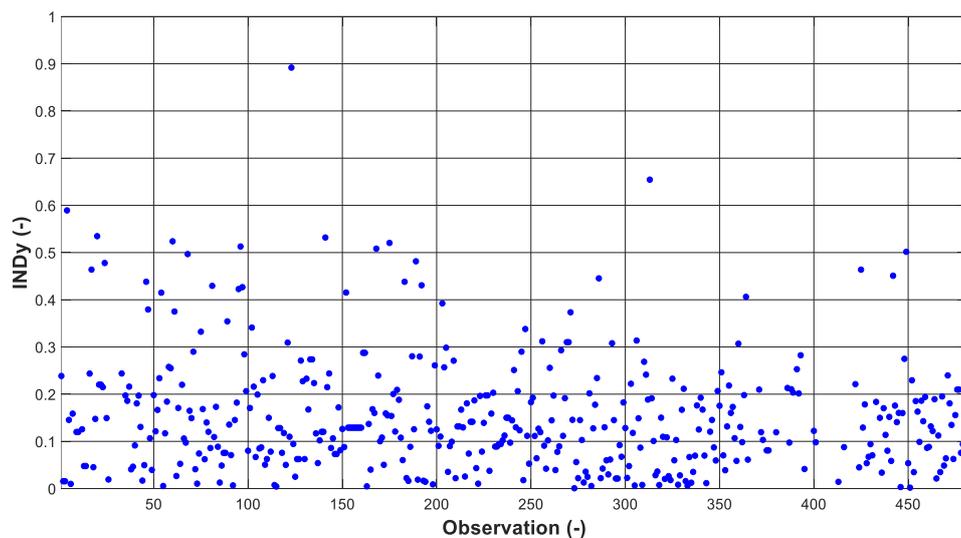


Figura 142 Indice relativo al primo modo di vibrare del Santuario

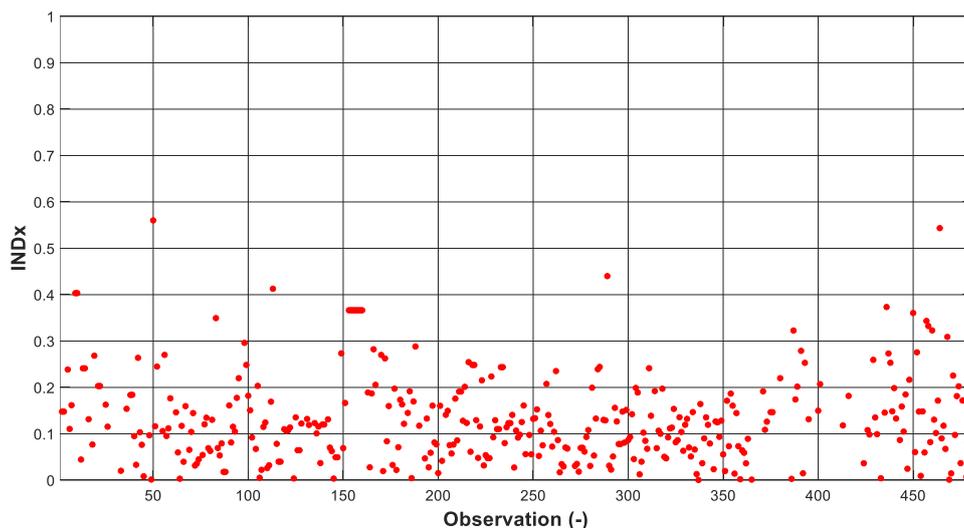


Figura 143 Indice relativo al secondo modo di vibrare del Santuario

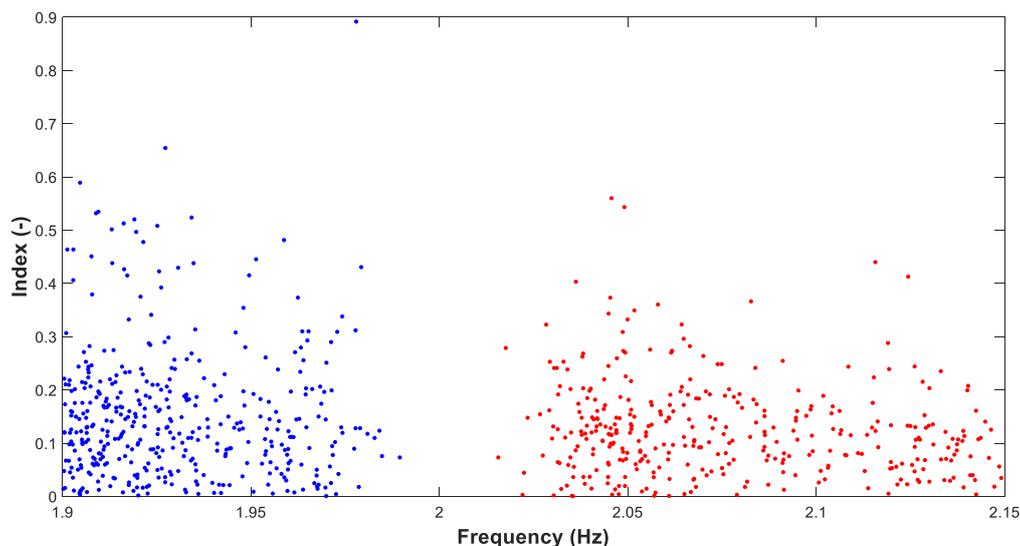


Figura 144 Indice in funzione delle frequenze

I valori dell'indice precedentemente definito, sia per la prima che per la seconda frequenza, si mantengono bassi per la maggior parte delle osservazioni. Questo sembra indicare un comportamento della struttura non dettato dal moto del terreno sottostante ma legato al moto deformativo del Santuario.

Un altro tipo di approccio sperimentale a cui ci si è avvicinati per indagare l'influenza del terreno sul comportamento della struttura è legato alla presenza di acqua del terreno. La fluttuazione del livello della falda acquifera infatti, incidendo sulla rigidità del terreno, potrebbe avere una certa influenza sul comportamento dinamico della struttura che si erge al di sopra.

Sfortunatamente non abbiamo dati registrati dai piezometri relativi allo stesso periodo a cui corrispondono i parametri registrati dal sistema di monitoraggio statico. Inoltre non è stato possibile utilizzare tecniche di predizione dei dati a causa dell'assenza di correlazione tra profondità di falda e frequenze, come invece è stato fatto per le temperature nel capitolo 6.

5.4.2 Approccio numerico

Il modello termomeccanico del Santuario, realizzato in passato grazie al software di analisi agli elementi finiti Ansys, può aiutare nell'indagine volta alla scoperta della relazione esistente tra il comportamento dinamico della struttura e il terreno su cui è stato eretto il Santuario.

Si è realizzato un modellino del terreno, nel quale si è fatto variare il livello di falda da un livello massimo, ipotizzando la falda a livello del piano campagna, fino ad un livello minimo ipotizzato a 5 m di profondità, in corrispondenza dello strato medio di marna. Conoscendo i valori dei moduli di compressione E e di taglio G del terreno in condizione di massimo (E_w) e minimo (E_d) contenuto

d'acqua grazie a letteratura pregressa [17], si è utilizzato le seguenti formule per definire la rigidezza del terreno al variare della profondità di falda H_w

$$E_{x,y} = E_d * \frac{H_w}{H} + E_w * \frac{(H-H_w)}{H},$$

$$E_z = \frac{H}{\frac{H_w}{E_d} + \frac{(H-H_w)}{E_w}}.$$

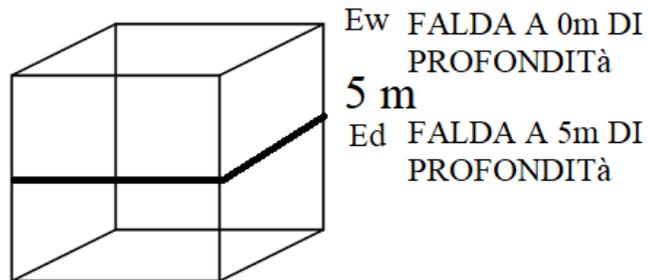


Figura 145 Modellino del terreno

L'ipotesi alla base è quella di accostare il comportamento del terreno a quello di un sistema di molle in parallelo in direzione x e y, e ad un sistema di molle in serie in direzione z, il parametro H rappresenta l'altezza del modellino di terreno. Facendo variare la profondità di falda di 0.5 m, si è definita la rigidezza del terreno che è stata inserita nel modello agli elementi finiti del Santuario, ed al variare di questi parametri si è determinate le frequenze numeriche del Santuario.

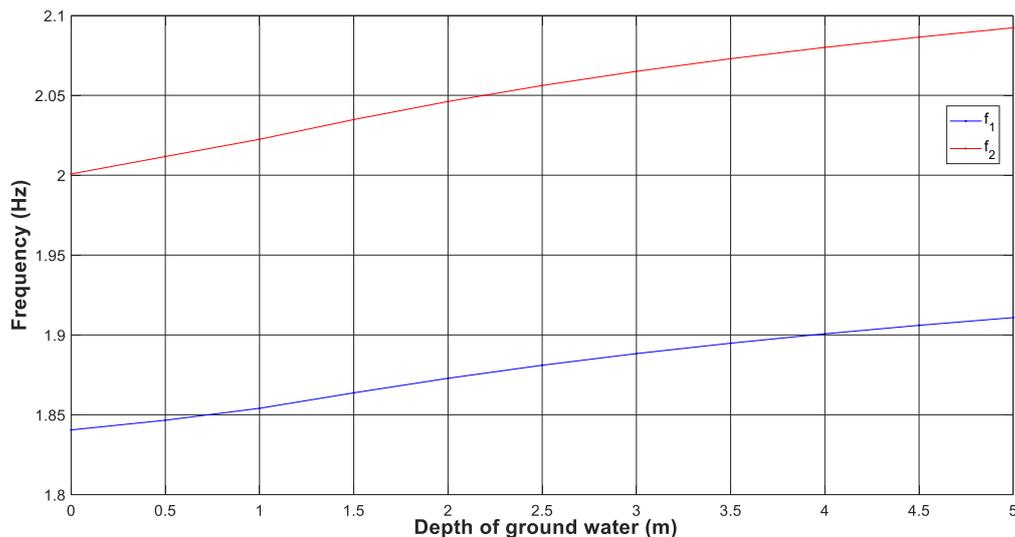


Figura 146 Variazione delle frequenze del modello FEM al variare della profondità di falda

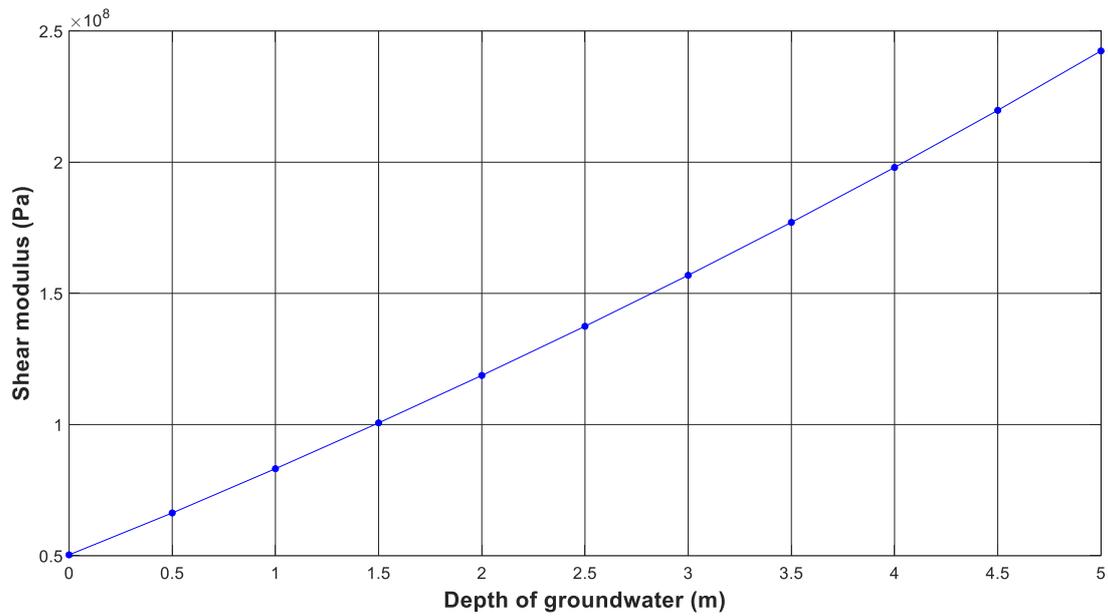


Figura 147 Variazione del modulo di taglio G al variare della profondità di falda

Questo approccio numerico, possibile grazie all'esistenza di un modello agli elementi finiti del Santuario, sembra aver individuato la presenza di una correlazione esistente tra la profondità di falda nel terreno su cui si erge e il comportamento dinamico della struttura, che sembra avere frequenze più alte quando il contenuto d'acqua del terreno è più basso, e quindi il modulo di taglio più alto.

Non si è riusciti ad ottenere un riscontro sperimentale di questo risultato.

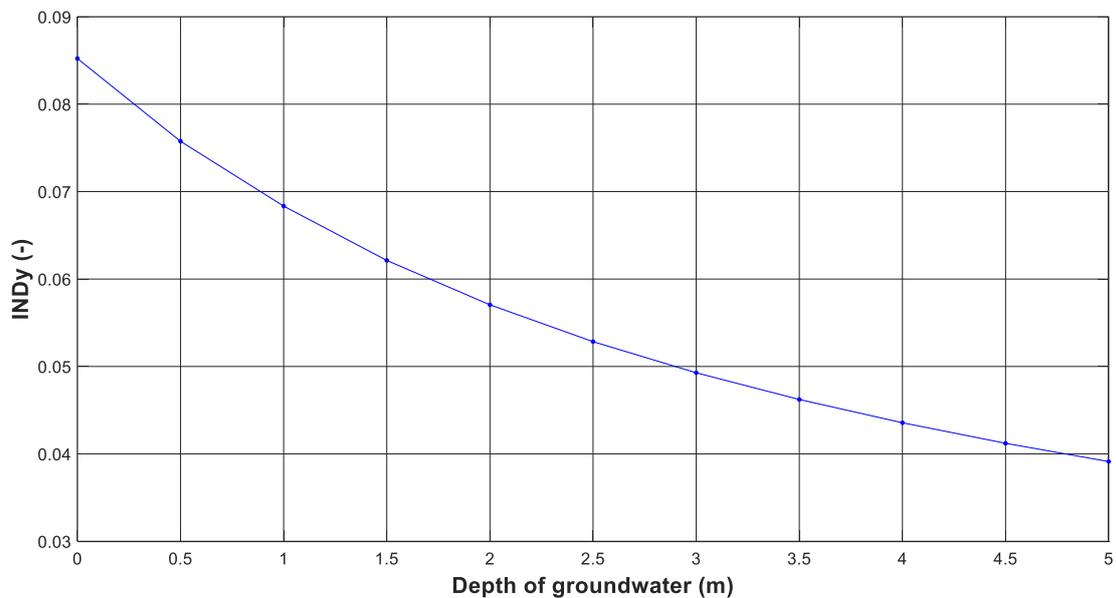


Figura 148 Variazione dell'indice $INDY$ al variare della profondità di falda

6. Applicazione al Damage Detection

Nell'ultima parte di questo lavoro si è cercato di sfruttare i risultati ottenuti dall'analisi di correlazione dei dati a disposizione per cercare di migliorare il processo di identificazione del danno strutturale sul Santuario di Vicoforte sviluppato in lavori precedenti [2].

6.1 Cointegrazione e tecniche di machine learning per l'identificazione del danno strutturale

Recenti studi hanno dimostrato l'efficacia delle tecniche di machine learning nel campo dello Structural Health Monitoring, utilizzate per distinguere le variazioni dei parametri dinamici dovute ad effetti operazionali ed ambientali da quelle dovute all'evoluzione di un danno. La combinazione di queste tecniche con la cointegrazione, tecnica nota in campo economico, sembrano portare a risultati importanti nell'identificazione del danno anche in complessi monumentali come il Santuario di Vicoforte.

Il precedente lavoro [2] ha portato allo sviluppo di un metodo di identificazione del danno a partire dalle frequenze sperimentali ottenute dalle identificazioni dinamiche dei segnali registrati dal sistema di monitoraggio di Vicoforte utilizzando la tecnica della cointegrazione insieme ad algoritmi quali Support Vector Machine (SVM) o Relevance Vector Machine (RVM) necessari per l'implementazione della regressione multivariata richiesta dal metodo.

Partendo da un set di dati non stazionari, se ne vuole definire una loro combinazione stazionaria che possa essere utilizzata come parametro di controllo (residuo ε); se questa combinazione esiste allora le serie di dati sono definite cointegrate. Questo parametro può essere utilizzato come indicatore di danno ed è stazionario al variare di effetti operazionali e ambientali (Environmental and Operational Variations EOVs) in quanto funzione esclusivamente dei set di dati non stazionari presi in considerazione, mentre la sua media e la sua varianza dovrebbero risentire della presenza di un danno.

La tecnica di regressione vuole creare un modello tra due o più serie numeriche, che costituiscono una o più variabili indipendenti (predittore) ed una variabile dipendente (risposta). L'obiettivo è quello di fare in modo che il residuo vari il meno possibile in assenza di danno ed invece vari maggiormente quando la struttura è danneggiata rendendo il danno facilmente individuabile.

In questo metodo la regressione viene realizzata grazie ad algoritmi di machine learning, in particolare SVM. L'algoritmo modella una funzione che imita il comportamento dinamico della struttura non

danneggiata in determinate condizioni esterne; quando sopraggiunge il danno il dato registrato diverge dalla funzione predetta e il Damage Indicator individua il danno.

I Support Vector Machines (SVM) sono modelli di supervised learning combinati con una specifica classe di algoritmi di apprendimento (Statistical Learning Theory) utilizzati sia per la classificazione che per l'analisi di regressione. L'uso di kernel, la possibilità di rendere convessa la funzione di ottimizzazione (assenza di minimi locali), la scarsità della soluzione e la capacità di controllare il confine decisionale concentrandosi su punti di dati significativi (i vettori di supporto) presentano un modello di regressione SVM. Lo scopo di una regressione SV è trovare una funzione che si discosti dalle misurazioni osservate di un valore non superiore al cosiddetto parametro di insensibilità, per ogni punto all'interno del training set, e che allo stesso tempo sia il più piatto possibile. Questo è uno degli iperparametri che regolano l'algoritmo, insieme al parametro trade-off (o box-limit) che controlla la penalità applicata per evitare un overfitting. In effetti, attraverso la dipendenza da vincoli strutturali, SVM minimizza l'overfit massimizzando il margine attorno alla linea discriminante.

Il precedente lavoro ha portato alla predizione del set di dati della prima frequenza f_1 del Santuario di Vicoforte identificata a partire dalla set di dati della seconda f_2 utilizzando l'algoritmo di machine learning SVM, e quindi l'elaborazione di un indicatore di danno ε contenente le informazioni dei dati sperimentali delle prime due frequenze della struttura.

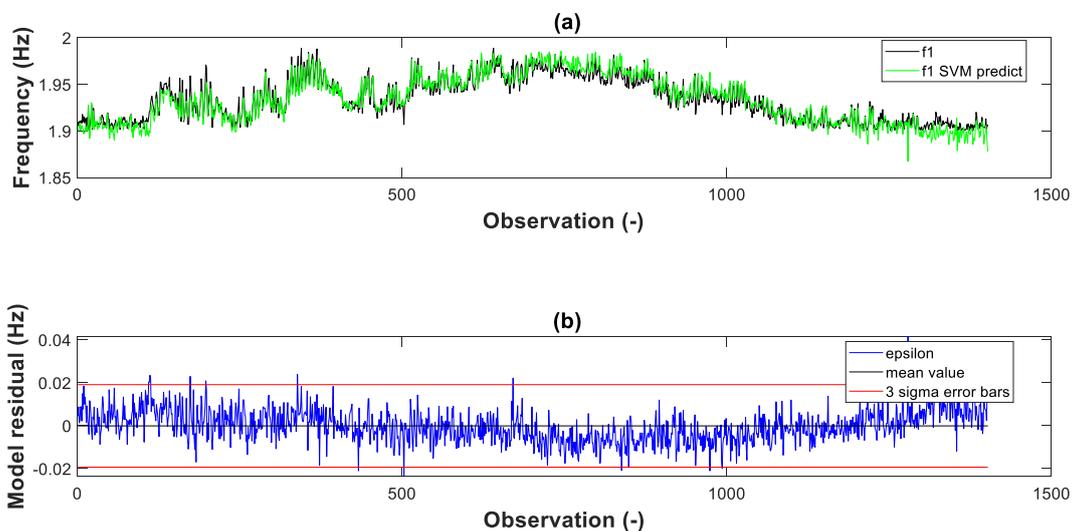


Figura 149 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1$ (b)

Il primo passo dell'analisi consiste nel selezionare un appropriato set di training data; per avere un numero consistente di dati si è deciso di utilizzare le identificazioni dei segnali di 7 ore al giorno per un periodo che va dal 01/12/2016 al 31/01/2019. È conveniente scegliere un range di dati con grandi variazioni, per ottenere un modello che sia in grado di riconoscere l'accadimento di un evento simile.

Sono stati quindi analizzati una serie di dati ambientali per valutare il set di training data da utilizzare in base a determinati fenomeni esterni sopraggiunti. Dopo aver ottenuto \bar{f}_1 , vale a dire il modello della prima frequenza, si passa al calcolo del residuo $\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1(f_1, f_2)$, fattore dipendente quindi esclusivamente dalle variabili cointegrate f_1 e f_2 .

6.2 Miglioramento indicatore di danno a partire dai dati raccolti

Partendo dal metodo precedentemente definito per individuare un danneggiamento del Santuario di Vicoforte e distinguere gli effetti di quest'ultimo sulle frequenze dagli EOVs, si è cercato di sfruttare le informazioni ricavate dalle analisi di correlazione dei dati del sistema di monitoraggio statico con gli effetti ambientali in modo da ottenere un modello di frequenza predetta \bar{f}_1 che potesse contenere più informazioni e quindi avere un valore di errore inferiore.

6.2.1 Effetto della temperatura interna

Considerando la temperatura come elemento con maggiore influenza sul comportamento dinamico della struttura, si è partiti dall'evidente correlazione esistente tra la temperatura ambientale e la temperatura interna misurata dai termometri dei sistemi di monitoraggio dinamico, come possiamo vedere in figura.

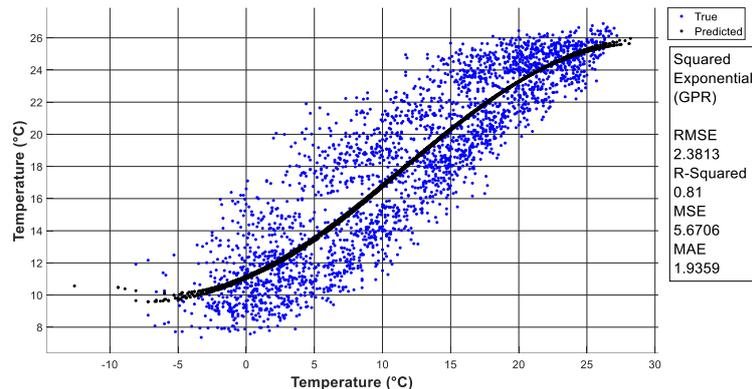


Figura 150 Correlazione tra temperatura media esterna e temperatura interna

Sfortunatamente non abbiamo a disposizione i dati di temperatura interna acquisiti nello stesso lasso di tempo dei dati di accelerazioni registrati e quindi dei valori di frequenza a disposizione, che potrebbero rappresentare un'informazione utile per migliorare il modello di frequenza predetta \bar{f}_1 .

Una soluzione al problema dell'assenza di dati ci viene fornito dalle tecniche di machine learning. L'algoritmo di Support Vector Machine ci permette di ottenere dei dati di temperatura interna, che chiameremo predetti, relativi al lasso temporale di cui sono state identificate le frequenze, a partire dalla correlazione con la temperatura media esterna.

I dati di temperatura ambientale media giornaliera sono scaricabili dal sito di ARPA Piemonte (dati dal 2004 al 2019), e sono utilizzati come predittore, invece i dati di temperatura interna sono registrati dal

termometro n°7 posto lungo l'ellisse interno della cupola all'altezza del tamburo (dati dal 2004 al 2015) e sono utilizzati come risposta.

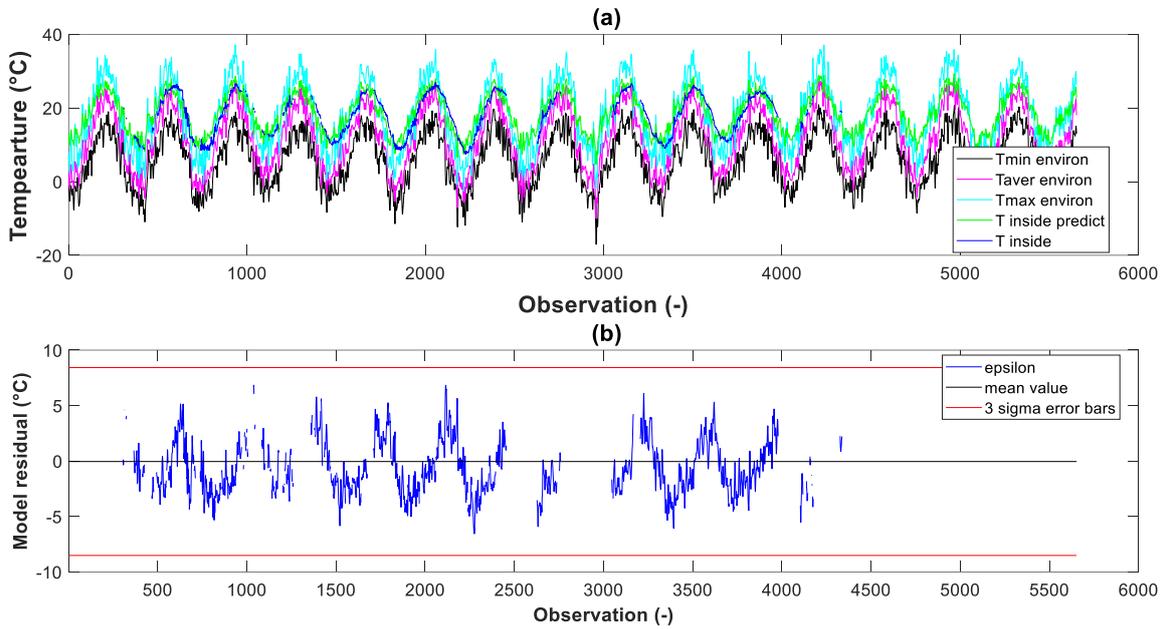


Figura 151 Modello SVM della temperatura interna utilizzando la temperatura ambientale

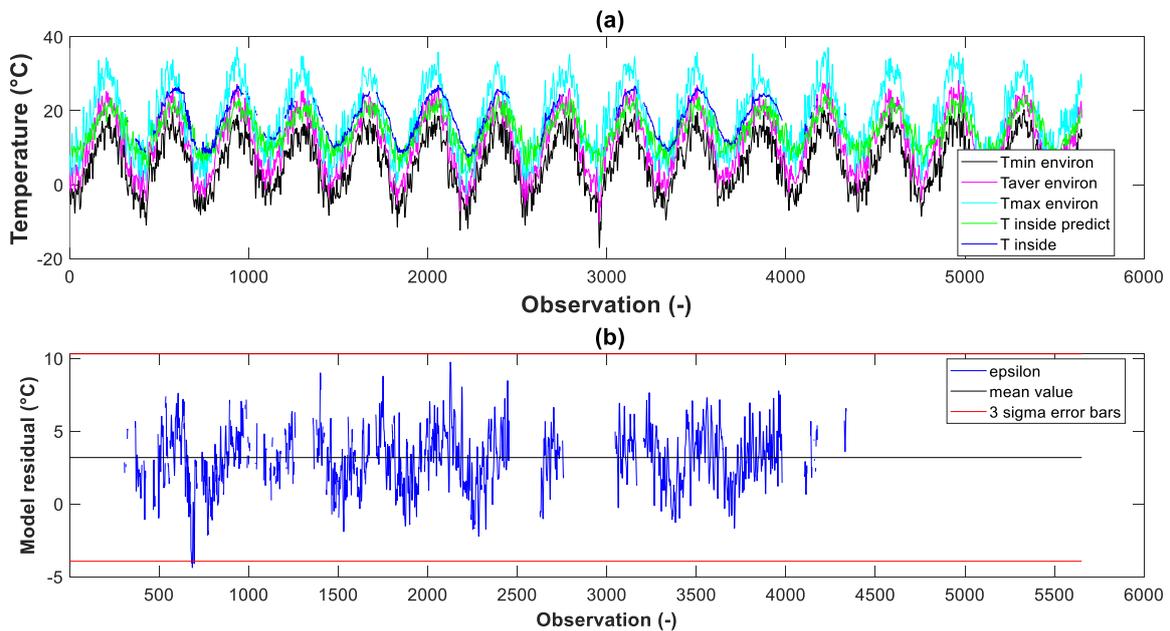


Figura 152 Modello SVM della temperatura interna utilizzando la temperatura ambientale con shift di 11 giorni

Come possiamo vedere in figura, sembra esserci uno shift in avanti dei picchi dei dati di temperatura interna rispetto a quelli di temperatura esterna, probabilmente dovuto all'inerzia termica della muratura.

Si è quindi deciso di applicare uno shift al modello di temperatura interna ottenuto. Shiftando il modello ottenuto di un lasso temporale pari ad 11 giorni, vale a dire 11 osservazioni, si ottiene il minimo errore tra la temperatura interna e il suo modello, calcolato in termini di RMSE, pari a 3.6905.

Avendo ora a disposizione il modello SVM dei valori della temperatura interna misurata dal termometro n°7 posto nella parte interna della cupola, abbiamo un'informazione in più da fornire all'algoritmo SVM per la realizzazione del modello della prima frequenza \bar{f}_1 . Creiamo un modello di regressione tra la variabile risposta f_1 e le variabili predittori f_2 e $T_{int}(T_{amb})$, quest'ultima predetta a partire dalla temperatura ambientale. Il residuo del modello, utilizzato poi come indicatore di danno sarà

$$\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1(f_1, f_2, T_{int}(T_{amb})).$$

Scegliendo accuratamente il set di training data da utilizzare si è arrivati ad ottenere un modello migliore di f_1 rispetto a quello ottenuto a partire dalle sole informazioni fornite dalle frequenze. Questo risultato ci porta a pensare che l'introduzione dei dati di temperatura rende l'indicatore di danno maggiormente preciso in quanto riesce ad eliminare gli effetti sulle frequenze dovuti alla temperatura e quindi a distinguerli da quelli che invece sono legati ad un danneggiamento della struttura.

In termini di errore del modello di f_1 , il valore di RMSE del modello ottenuto utilizzando solamente le informazioni fornite dalle frequenze è pari a 0.0071, invece utilizzando le frequenze e la temperatura interna si ha un modello con errore di 0.00644.

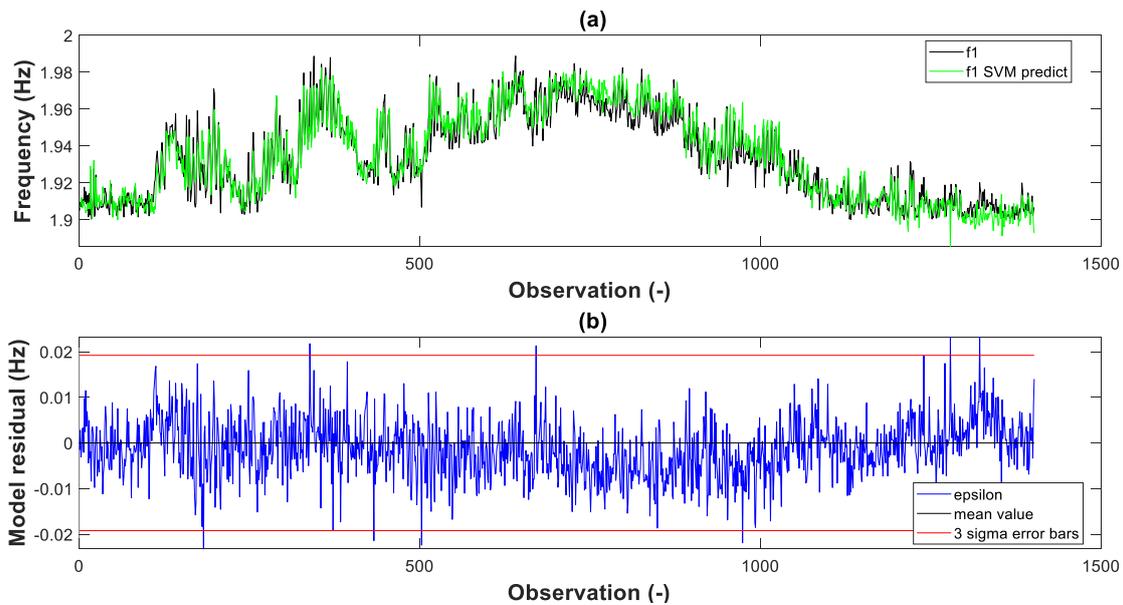


Figura 153 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 e $T_{interna}$ (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1$ (b)

6.2.3 Effetto della tensione nelle barre del sistema di cerchiaggio

L'analisi di correlazione tra i dati a disposizione ha evidenziato, come abbiamo visto nel capitolo precedente, un andamento abbastanza chiaro dei valori di forza nelle barre del sistema di cerchiaggio misurata dalle celle di carico in funzione della temperatura. Questo fa ipotizzare quindi che non sia la temperatura direttamente ad influenzare l'andamento delle frequenze della struttura, ma che questa sia la causa della fluttuazione della tensione nelle barre e che quindi questa vada ad influire sulle frequenze oltre che sull'apertura delle fessure.

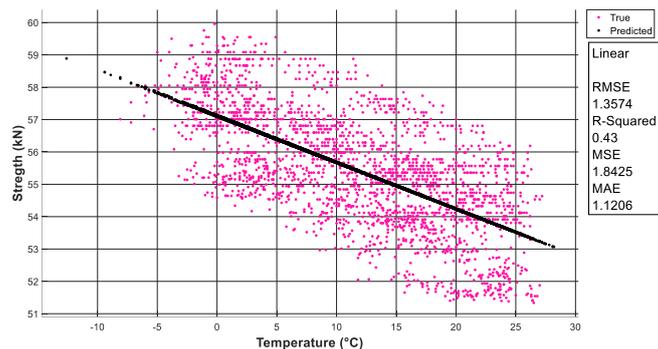


Figura 154 Correlazione tra temperatura media esterna e forza nelle barre di acciaio

I dati di tensione nelle barre di acciaio che la Principal Component Analysis (PCA) ha definito essere quelli più influenti sono quelli misurati dalla cella di carico n°5, posta in corrispondenza del finestrone della cupola in direzione sud-ovest.

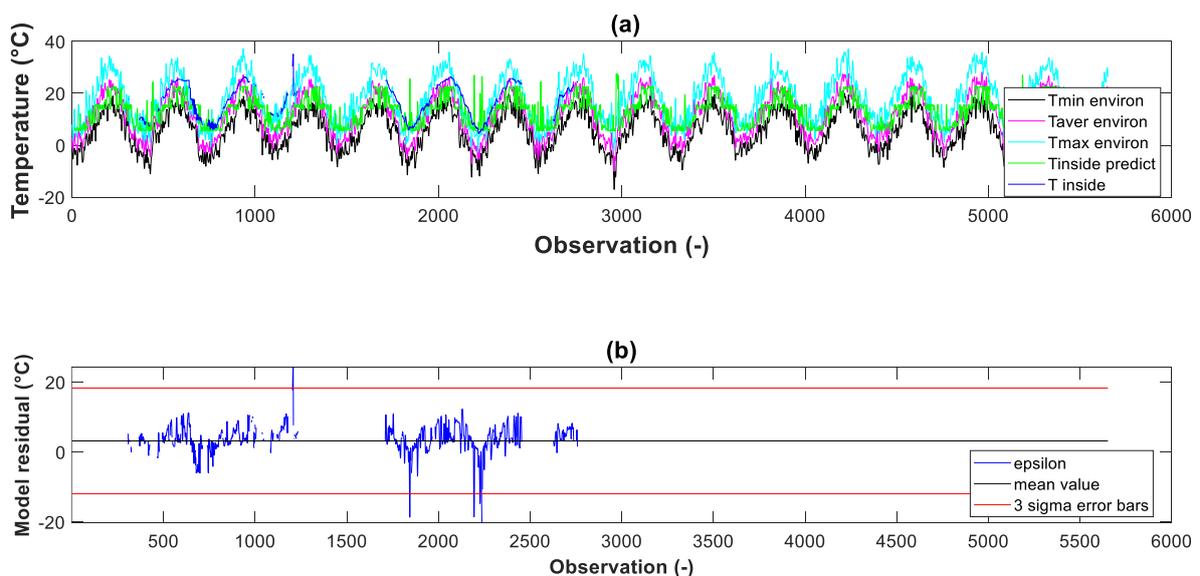


Figura 155 Modello SVM della temperatura interna utilizzando la temperatura ambientale con shift di 14 giorni

Nei pressi della cella di carico è stato posizionato un gruppo di termometri, tra cui il termometro n°13; si ha quindi ragione di credere che i dati del termometro n°13 siano quelli più adatti da utilizzare per predire un modello dei dati di forza nelle barre misurati dalla cella di carico n°5. L'algoritmo SVM ha permesso di avere un modello delle temperature misurate dal termometro n°13 a partire dai dati di temperatura ambientale; anche in questo caso si ottiene un modello di regressione con errore minore se shiftato di un lasso di tempo, pari a 14 giorni (RMSE 5.5457).

Il modello SVM della temperatura interna ottenuto è stato quindi utilizzato come predittore del modello SVM della forza nelle barre (RMSE 2.2626).

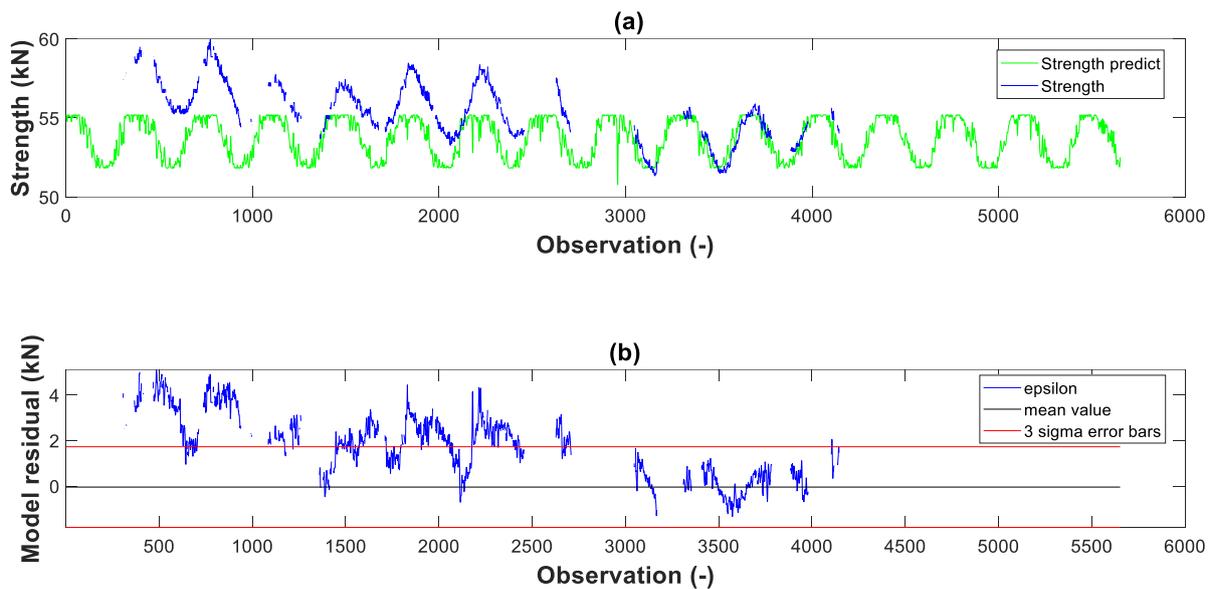


Figura 156 Modello SVM della forza nelle barre utilizzando la temperatura interna

Il modello SVM della forza nelle barre ottenuto è stato utilizzato come predittore, insieme ai dati forniti dalle frequenze, per ottenere il modello della prima frequenza \bar{f}_1 . Creiamo un modello di regressione tra la variabile risposta f_1 e le variabili predittori f_2 e $F(T_{int}(T_{amb}))$, quest'ultima predetta a partire dalla temperatura interna, a sua volta ottenuta da quella ambientale. Il residuo del modello, utilizzato poi come indicatore di danno sarà

$$\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1(f_1, f_2, F(T_{int}(T_{amb}))).$$

Scegliendo accuratamente il set di training data da utilizzare si è arrivati ad ottenere un modello migliore di f_1 rispetto a quello ottenuto a partire dalle sole informazioni fornite dalle frequenze, ma peggiore rispetto a quello contenente anche le informazioni di temperatura.

In termini di errore del modello di f_1 , il valore di RMSE del modello ottenuto utilizzando le frequenze e la forza nelle barre è pari a 0.0065.

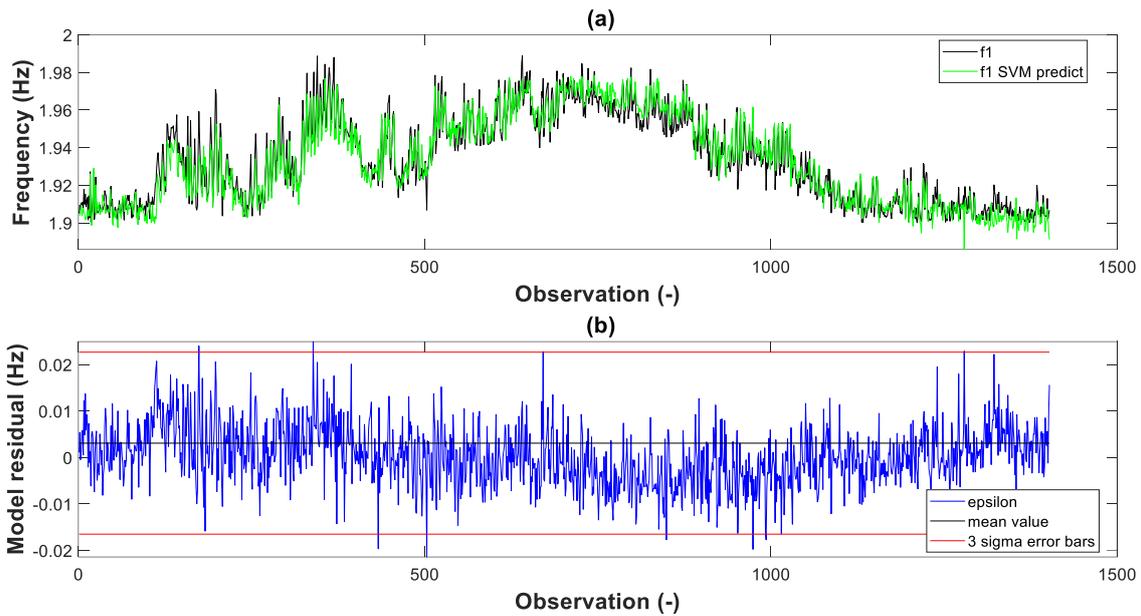


Figura 157 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 e la forza nelle barre (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1$ (b)

6.2.4 Effetto combinato della tensione nelle barre e della temperatura

Un altro tentativo di migliorare ancora il modello di f_1 ha visto l'utilizzo di tutte le informazioni a disposizione, quali frequenze, temperatura interna e forza nelle barre. Si è creato un modello di regressione tra la variabile risposta f_1 e le variabili predittori f_2 , $F(T_{int}(T_{amb}))$ e $T_{int}(T_{amb})$. Il residuo del modello, utilizzato poi come indicatore di danno sarà

$$\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1(f_1, f_2, F(T_{int}(T_{amb})), T_{int}(T_{amb})).$$

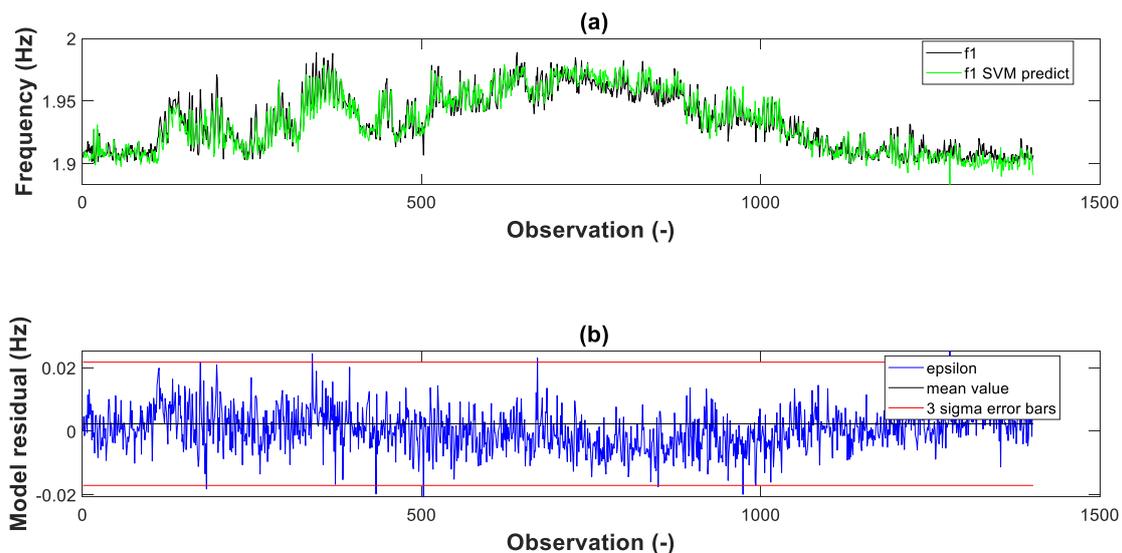


Figura 158 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 , la forza nelle barre e la temperatura (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - \bar{f}_1$ (b)

In termini di errore del modello di f_1 , il valore di RMSE del modello ottenuto utilizzando le frequenze, la forza nelle barre e la temperatura è pari a 0.006392.

7. Conclusioni

Monitorare lo stato di salute di una struttura o, come nel nostro caso, di un bene architettonico, è oggi lo strumento più efficace per acquisire quante più informazioni possibile sul comportamento di edifici storici. Innovative tecniche nell'ambito dello Structural Health Monitoring si collocano nella fase successiva al monitoraggio della salute strutturale, e, tramite strumenti statistici e algoritmi di machine learning, si pongono l'obiettivo di prevedere la risposta futura del sistema ed identificare in tempo reale l'eventuale comparsa del danno.

È in questo scenario che il caso studio preso in esame, la Basilica “Regina Montis Regalis” di Vicoforte (CN), rappresenta un eccezionale esempio di come la presenza di un sistema di monitoraggio statico e di un sistema di monitoraggio dinamico possano fornire un enorme contributo nell'indagine di un complesso monumentale così complesso.

L'individuazione della comparsa del danno, secondo le sopracitate tecniche, si basa sul rilevamento di variazioni sospette dell'andamento delle frequenze strutturali; queste però sono anche soggette a fattori ambientali e operative (EOVs), e risulta quindi fondamentale distinguerne gli effetti.

Lo studio sistematico degli agenti che possono influenzare il comportamento della struttura, passato dalla raccolta e il trattamento dei dati ambientali legati al sito di Vicoforte e di quelli provenienti dal sistema di monitoraggio statico e dinamico installati sul complesso, ha portato alla luce alcuni fenomeni che permettono di fare chiarezza sul comportamento della struttura.

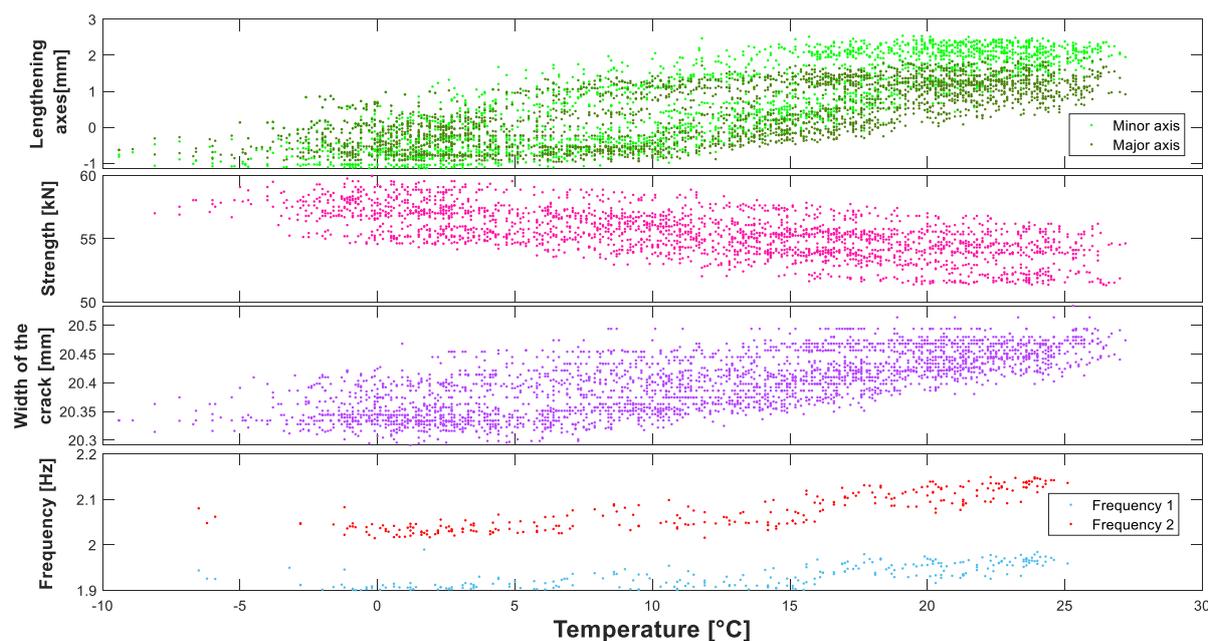


Figura 159 Sub plot correlazioni rilevanti tra temperatura e dati statici e dinamici

Le analisi di correlazione statistica tra i dati a disposizione hanno evidenziato una certa dipendenza tra il comportamento della struttura, sia esso statico o dinamico, e la variazione di temperatura. Come illustrato infatti in figura 1, un incremento delle temperature corrisponde ad un allungamento degli assi della cupola, ad una diminuzione della forza nelle barre del sistema di cerchiaggio misurata dalle celle di carico, ad una dilatazione delle fessure e ad un incremento delle frequenze, (fatta eccezione per le basse temperature).

Sulla base di questi risultati sono state elaborate le seguenti interpretazioni:

- L'allungamento dei fili, che misurano la convergenza, posti lungo l'asse maggiore e l'asse minore indicano che la muratura si espande all'aumentare della temperatura e che i lati tra loro opposti si allontanano.
- Si suppone che la riduzione della tensione nelle barre d'acciaio del sistema di cerchiaggio sia causata da un fenomeno di ammorbidimento delle barre all'aumentare delle temperature.
- Si è ipotizzato che la correlazione tra l'ampliamento delle fessure e la temperatura non sia un fenomeno di causalità diretta, ma sia piuttosto dovuto alla minore efficacia delle barre del sistema di cerchiaggio, la cui efficacia diminuisce all'aumentare della temperatura;
- Il comportamento dinamico della struttura merita sicuramente maggiori approfondimenti; l'andamento delle frequenze in funzione della temperatura sembra ricordare quello del volume dell'acqua, shiftato di circa 8 °C. Questo porterebbe a credere che il fenomeno sia legato ad uno stato di coazione tra la muratura e l'acqua, il cui aumento di volume irrigidirebbe la struttura. Lo shift è dovuto all'inerzia termica della temperatura, che fa sì che la temperatura interna della muratura risulti positiva compresa tra 0 e 4 °C quando quella esterna è già scesa sotto lo zero. Questo farebbe pensare ad una possibile dipendenza tra comportamento dinamico della struttura e l'altezza di falda, che influenza la rigidità del terreno.

I risultati delle analisi di correlazione dei dati a disposizione sono stati applicati nell'ambito del Damage Detection, nel tentativo di migliorare un metodo di identificazione del danno basato su cointegrazione ed algoritmi di machine learning.

Il lavoro precedentemente sviluppato sulla Basilica di Vicoforte ha portato alla predizione del set di dati della prima frequenza strutturale implementando una regressione tramite SVM. Il residuo di tale regressione, basata solo su dati dinamici, era stato utilizzato come indicatore di danno poiché risultava poco influenzato dagli effetti di EOVs.

Grazie alla correlazione esistente tra frequenza e temperatura ambientale, implementando una regressione non solo sulle frequenze, ma anche sui dati di temperatura interna, predetta tramite modello di regressione a partire da quella ambientale, si è riusciti ad ottenere un migliore modello della prima frequenza f_1 , e a migliorare l'indicatore di danno.

Con la consapevolezza che la correlazione tra temperatura e frequenza potrebbe non essere una causalità diretta, ma influenzata da altri fattori quali la tensione nelle barre, si è proceduto ripetendo il processo utilizzando anche i dati di forza nelle barre. Non avendo a disposizione i dati di temperatura interna e di forza degli ultimi anni, se ne è fatta una predizione basata sull'andamento della temperatura ambientale, a partire da dati meno recenti.

Il miglioramento del modello della frequenza è stato misurato in termini di Root Mean Square Error, più basso per modelli migliori, e di R-Squared, prossimo all'unità per modelli migliori.

	RMSE	R ²
SVM FREQ.	0.0071	0.9011
SVM FREQ.+FORZA	0.0065	0.9176
SVM FREQ.+TEMP.	0.006442	0.9190
SVM FREQ.+TEMP.+FORZA	0.006392	0.9202

Si ha ragione di credere che questo risultato sia dovuto all'influenza esercitata dalla temperatura interna e dall'efficacia del sistema di cerchiaggio sul comportamento dinamico della struttura, secondo un rapporto di causalità che possiamo vedere illustrato in figura 2.

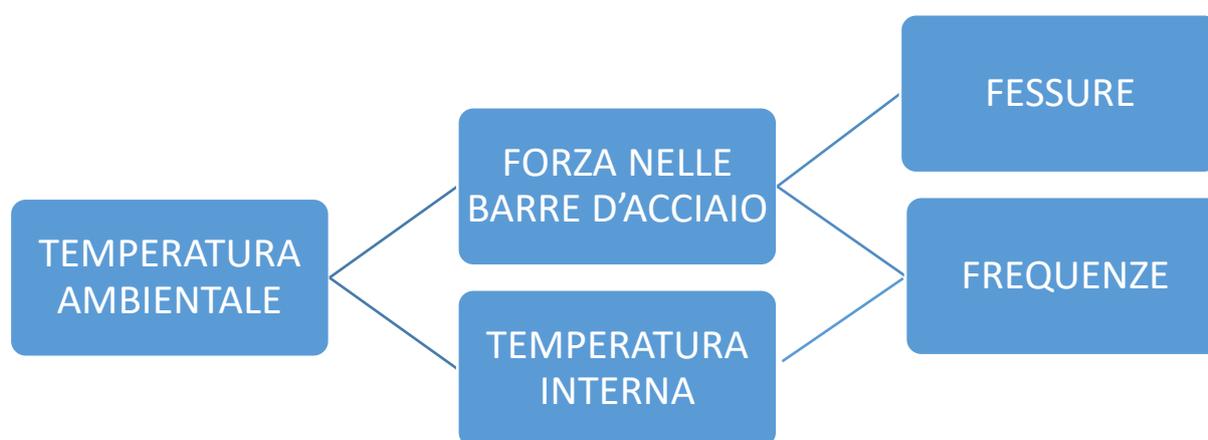


Figura 160 Organigramma di causalità dei dati analizzati

I risultati ottenuti aprono la strada a numerose possibilità per sviluppare lavori futuri.

Molto interessante è l'andamento delle frequenze in funzione della temperatura e soprattutto l'apparente legame con l'andamento del volume dell'acqua. Sarà quindi necessario indagare a fondo l'ipotesi legata all'esistenza di uno stato di coazione tra l'acqua della muratura, che espandendosi favorisce un irrigidimento della struttura. Sarebbe inoltre interessante studiare sperimentalmente l'influenza dell'acqua nel terreno, che variandone la rigidità probabilmente condiziona le frequenze della struttura.

I tentativi di miglioramento del processo di damage detection hanno portato a risultati originali, frutto delle analisi di correlazione tra i dati raccolti e trattati. Il fatto che l'indicatore di danno migliori anche solo utilizzando una stima delle misure dei dati statici rende stimolante la possibilità di usare misure sperimentali delle stesse quantità o, se impossibile, di migliorare le stime avvalendosi di un modello statico della temperatura ambientale.

Indice figure

Figura 1 Vista prospettica della Basilica Regina Montis Regalis di Vicoforte(CN).....	7
Figura 2 Interno della cupola ovale più grande al mondo situata presso la Basilica di Vicoforte	8
Figura 3 Le condizioni operative e ambientali associate ad una piattaforma offshore fanno sorgere molti dubbi sulla realizzazione di un sistema di SHM	17
Figura 4 Facciata anteriore della Basilica di Vicoforte	19
Figura 5 Progetto modificato da Ascanio Vitozzi	20
Figura 6 Rappresentazione assonometrica del terreno al di sotto delle fondazioni.....	20
Figura 7 Ricostruzione grafica del Ponte Reale	21
Figura 8 Taglio assonometrico della basilica	22
Figura 9 Sistema cupola tamburo del Santuario di Vicoforte	23
Figura 10 Fessure e cedimenti lungo il perimetro del Santuario	24
Figura 11 Evoluzione dei cedimenti delle fondazioni nel tempo (Garro 1962)	25
Figura 12 Visuale esterna della fessura ad ovest.....	27
Figura 13 Posizionamento nuovo e vecchio sistema di cerchiaggio	28
Figura 14 Collegamenti in acciaio dei segmenti dei cavi di cerchiaggio	28
Figura 15 Visione delle campagne di indagine dal 1976 ad oggi.....	28
Figura 16 Immagini termografiche della facciata e della volta della cupola.....	29
Figura 17 Visione al laser scanner del santuario	29
Figura 18 Caratterizzazione del terreno	30
Figura 19 Fotografie scattate in occasione delle indagini geotecniche	31
Figura 20 MSC710 Sensor Controller Series LVDT	34
Figura 21 Configurazione planimetrica disposizione fessurimetri.....	34
Figura 22 Minipiezometri PP 16 SS AU	35
<i>Figura 23 Configurazione planimetrica celle di pressione a quota 3.5 m.....</i>	<i>35</i>
Figura 24 Configurazione planimetrica celle di pressione all'intradosso del tamburo e sui contrafforti	36
Figura 25 Configurazione planimetrica celle di pressione all'estradosso della cupola	36
Figura 26 Rappresentazione della disposizione dei cavi	37
Figura 27 Collegamenti tra i segmenti dei cavi.....	37
Figura 28 Rappresentazione della disposizione delle celle di carico	38
Figura 29 Rappresentazione della disposizione dei termometri	38
Figura 30 Rappresentazione disposizione fili per la convergenza	39

Figura 31 Unità di Acquisizione Centrale per la gestione dei dati del sistema di monitoraggio statico all'interno del Santuario di Vicoforte	40
Figura 32 Pagina web sito raccolta dati Gdtest	41
Figura 33 Immagini dell'interfaccia del software di acquisizione e del computer che è adibito alla gestione e alla raccolta dei dati registrati dal sistema di monitoraggio dinamico ed posto all'interno del Santuario di Vicoforte	42
Figura 34 Posizione accelerometri sistema di monitoraggio dinamico	43
Figura 35 Sistema di acquisizione dei dati dei sensori(a) e del sistema master/slave(b)	44
Figura 36 Esempio file .txt dei segnali registrati.....	45
Figura 37 Diagramma di flusso analisi modale sperimentale.....	49
Figura 38 Processo di adeguamento del modello ai dati	52
Figura 39 Schermata codice implementato su Matlab®	58
Figura 40 Diagramma di flusso del codice per l'implementazione automatica.....	59
Figura 41 Diagramma di stabilizzazione (frequenza/ordine del sistema)	61
Figura 42 Diagramma di clustering (frequenza/smorzamento) di 2 giorni consecutivi	62
Figura 43 Classificazione sulla base del numero di elementi di ogni cluster.....	63
Figura 44 Modi di vibrare del Santuario di Vicoforte.....	63
Figura 45 Segnale acquisito con rimozione media e trend.....	65
Figura 46 Segnale acquisito dal canale CB-SOvest_4 (Y). In rosso vediamo il segmento di 5 min con valore più elevato di Root Mean Square	66
Figura 47 Power Spectral Density (PSD).....	66
Figura 48 Diagramma di stabilizzazione.....	67
Figura 49 Diagramma di clustering.....	67
Figura 50 Diagramma di stabilizzazione e cluster ottenuti da identificazione XYZCR delle ore 12:10 del 19/01/2019.....	69
Figura 51 Vettore di deformazione modale output dell' identificazione XYZCR delle ore 12:10 del 19/01/2019.....	69
Figura 52 Prima frequenza identificata - primo modo dir. Y (range 1.892-1.989 Hz).....	70
Figura 53 Seconda frequenza identificata - primo modo dir. X (range 2.025-2.143 Hz).....	70
Figura 54 Applicazione "meteo" scaricabile dal sito di ARPA Piemonte.....	71
Figura 55 Temperatura media giornaliera ambientale – Osservazioni 2004-2018.....	72
Figura 56 Temperatura massima giornaliera ambientale – Osservazioni 2004-2018	72
Figura 57 Temperatura minima giornaliera ambientale – Osservazioni 2004-2018	73
Figura 58 Altezza di pioggia giornaliera – Osservazioni 2004-2018.....	73
Figura 59 Neve giornaliera- Osservazioni 2004-2018	74

Figura 60 Velocità del vento accumulata giornaliera – Osservazioni 2004-2018.....	74
Figura 61 Percentuale di umidità giornaliera _ Osservazioni 2004-2018	75
Figura 62 Plot dati ambientali ARPA osservazioni 2004-2018	76
Figura 63 Primi 2 modi di vibrare del Santuario di Vicoforte.....	77
Figura 64 Plot di tutti i dati registrati dal sistema di monitoraggio statico.....	78
Figura 65 Trend dati temperatura acquisiti dal termometro n°7 posto sull'ellisse interno in corrispondenza del tamburo a quota +32 m	79
Figura 66 Trend dati ampiezza fessura acquisiti dal fessurimetro n°8 posto sulla lato ovest della cupola	79
Figura 67 Trend dati profondità di falda acquisiti dal piezometro n°1	80
Figura 68 Trend dati convergenza asse minore della cupola.....	80
Figura 69 Trend dati acquisiti dalla cella di pressione n°12 posta all'estradosso della cupola a quota +50 m.....	81
Figura 70 Trend dati acquisiti dalla cella di carico n°20 posta in direzione nord-ovest	81
Figura 71 Illustrazione grafica della Singular Value Decomposition su una matrice di dati	82
Figura 72 Trend termometro n°7.....	83
Figura 73 Trend piezometro n°1	84
Figura 74 Trend fessurimetro n°8	84
Figura 75 Trend convergenza asse minore.....	85
Figura 76 Trend cella di carico n°11	85
Figura 77 Trend cella di pressione n°12.....	86
Figura 78 Finestra tool Regression Learner selezione input	87
Figura 79 Finestra tool Matlab Regression Learner per la scelta dei modelli di regressione.....	88
Figura 80 Modello di regressione forza nelle barre di acciaio-vento	90
Figura 81 Modello di regressione convergenza asse minore-vento	90
Figura 82 Modello di regressione ampiezza fessure-vento	91
Figura 83 Modello di regressione profondità di falda-vento.....	91
Figura 84 Modello di regressione pressione nella muratura-vento	92
Figura 85 Modello di regressione temperatura-vento	92
Figura 86 Modello di regressione frequenza 1-vento.....	93
Figura 87 Modello di regressione frequenza 2-vento.....	93
Figura 88 Modello di regressione forza nelle barre-umidità	94
Figura 89 Modello di regressione convergenza asse minore-umidità	94
Figura 90 Modello di regressione ampiezza fessura-umidità.....	95
Figura 91 Modello di regressione profondità di falda-umidità.....	95

Figura 92 Modello di regressione pressione nella muratura-umidità	96
Figura 93 Modello di regressione temperatura-umidità	96
Figura 94 Modello di regressione frequenza 1-umidità	97
Figura 95 Modello di regressione frequenza 2-umidità	97
Figura 96 Modello di regressione forza nelle barre-altezza di precipitazione.....	98
Figura 97 Modello di regressione convergenza asse minore-altezza di precipitazione.....	98
Figura 98 Modello di regressione ampiezza fessure-altezza di precipitazione	99
Figura 99 Modello di regressione profondità di falda-altezza di precipitazione	99
Figura 100 Modello di regressione pressione nella muratura-altezza di precipitazione	100
Figura 101 Modello di regressione temperatura-altezza di precipitazione.....	100
Figura 102 Modello di regressione frequenza 1-precipitazione	101
Figura 103 Modello di regressione frequenza 2- precipitazione	101
Figura 104 Modello di regressione forza nelle barre-neve.....	102
Figura 105 Modello di regressione convergenza asse minore-neve.....	102
Figura 106 Modello di regressione ampiezza fessura-neve.....	103
Figura 107 Modello di regressione profondità di falda-neve	103
Figura 108 Modello di regressione pressione nella muratura-neve.....	104
Figura 109 Modello di regressione temperatura-neve	104
Figura 110 Modello di regressione frequenza 1-neve	105
Figura 111 Modello di regressione frequenza 2-neve	105
Figura 112 Modello di regressione forza nelle barre-temperatura massima giornaliera	106
Figura 113 Modello di regressione convergenza asse minore-temperatura massima giornaliera	106
Figura 114 Modello di regressione ampiezza della fessura-temperatura massima giornaliera	107
Figura 115 Modello di regressione profondità di falda-temperatura massima giornaliera	107
Figura 116 Modello di regressione pressione nelle barre-temperatura massima giornaliera	108
Figura 117 Modello di regressione temperatura interna-temperatura massima giornaliera	108
Figura 118 Modello di regressione frequenza 1-temperatura massima giornaliera	109
Figura 119 Modello di regressione frequenza 2-temperatura massima giornaliera	109
Figura 120 Modello di regressione forza nelle barre-temperatura minima giornaliera.....	110
Figura 121 Modello di regressione convergenza asse minore-temperatura minima giornaliera.....	110
Figura 122 Modello di regressione apertura fessura-temperatura minima giornaliera.....	111
Figura 123 Modello di regressione profondità di falda-temperatura minima giornaliera	111
Figura 124 Modello di regressione pressione nella muratura-temperatura minima giornaliera.....	112
Figura 125 Modello di regressione termometro-temperatura minima giornaliera	112
Figura 126 Modello di regressione frequenza 1-temperatura minima giornaliera	113

Figura 127 Modello di regressione frequenza 2-temperatura minima giornaliera	113
Figura 128 Modello di regressione forza nelle barre-temperatura media giornaliera	114
Figura 129 Modello di regressione convergenza asse minore-temperatura media giornaliera	114
Figura 130 Modello di regressione apertura fessure-temperatura media giornaliera	115
Figura 131 Modello di regressione profondità di falda-temperatura media giornaliera.....	115
Figura 132 Modello di regressione pressione muratura-temperatura media giornaliera.....	116
Figura 133 Modello di regressione temperatura interna-temperatura media giornaliera	116
Figura 134 Modello di regressione frequenza 1-temperatura media giornaliera.....	117
Figura 135 Modello di regressione frequenza 2-temperatura media giornaliera.....	117
Figura 136 Andamento indice RMSE prendendo in considerazione le correlazioni tra variabili	118
Figura 137 Andamento indice R-Squared prendendo in considerazione le correlazioni tra variabili .	118
Figura 138 Trend dati celle di pressione-temperatura media giornaliera 2004-2009.....	119
Figura 139 Allungamento degli assi della cupola ovale in funzione della temperatura.....	120
Figura 140 Forza misurata dalle celle di carico e apertura delle fessure in funzione della temperatura	120
Figura 141 Andamento frequenza - temperatura esterna e andamento volume dell'acqua - temperatura a confronto	121
Figura 142 Indice relativo al primo modo di vibrare del Santuario	123
Figura 143 Indice relativo al secondo modo di vibrare del Santuario.....	123
Figura 144 Indice in funzione delle frequenze	124
Figura 145 Modellino del terreno.....	125
Figura 146 Variazione delle frequenze del modello FEM al variare della profondità di falda	125
Figura 147 Variazione del modulo di taglio G al variare della profondità di falda.....	126
Figura 148 Variazione dell'indice INDy al variare della profondità di falda	126
Figura 149 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - f_1$ (b)	128
Figura 150 Correlazione tra temperatura media esterna e temperatura interna.....	129
Figura 151 Modello SVM della temperatura interna utilizzando la temperatura ambientale	130
Figura 152 Modello SVM della temperatura interna utilizzando la temperatura ambientale con shift di 11 giorni	130
Figura 153 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 e $T_{interna}$ (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - f_1$ (b).....	131
Figura 154 Correlazione tra temperatura media esterna e forza nelle barre di acciaio	132
Figura 155 Modello SVM della temperatura interna utilizzando la temperatura ambientale con shift di 14 giorni	132

Figura 156 Modello SVM della forza nelle barre utilizzando la temperatura interna.....	133
Figura 157 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 e la forza nelle barre (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - \hat{f}_1$ (b)	134
Figura 158 Modello SVM di f_1 utilizzando f_2 , la forza nelle barre e la temperatura (a) e andamento del residuo del modello $\varepsilon = f_1 - \hat{f}_1$ (b).....	134
Figura 159 Sub plot correlazioni rilevanti tra temperatura e dati statici e dinamici.....	137
Figura 160 Organigramma di causalità dei dati analizzati	139

Bibliografia

- [1] FARRAR, Charles R.; WORDEN, Keith. *Structural Health Monitoring.: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] COLETTA, Giorgia, et al. Use of the cointegration strategies to remove environmental effects from data acquired on historical buildings. *Engineering Structures*, 2019, 183: 1014-1026.
- [3] FARRAR, Charles R.; WORDEN, Keith. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 365.1851: 303-315.
- [4] CERAVOLO, Rosario, et al. Vibration-based monitoring and diagnosis of cultural heritage: a methodological discussion in three examples. *International Journal of Architectural Heritage*, 2016, 10.4: 375-395.
- [5] DE STEFANO, A.; CERAVOLO, R. Assessing the health state of ancient structures: the role of vibrational tests. *Journal of intelligent material systems and structures*, 2007, 18.8: 793-807.
- [6] AOKI, Takayoshi; CHIORINO, Mario Alberto; ROCCATI, Roberto. Structural characteristics of the elliptical masonry dome of the Sanctuary of Vicoforte. In: *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, S. Huerta, ed. Madrid: Instituto Juan de Herrera. 2003. p. 203-212.
- [7] CHIORINO, M. A., et al. Monitoring and modeling strategies for the world's largest elliptical dome at Vicoforte. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC'2006)*. New Dehli, India: MacMillan, 2006. p. 1161-1170.
- [8] CERAVOLO, Rosario, et al. Monitoring of masonry historical constructions: 10 years of static monitoring of the world's largest oval dome. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24.10: e1988.
- [9] CERAVOLO, Rosario, PECORELLI, Marica L., 2017. *Monitoraggio statico e dinamico del complesso monumentale regina montis regalis. Relazione annuale 2016*.
- [10] CERAVOLO, Rosario; DE LUCIA, Giulia; PECORELLI, Marica L. Issues on the modal characterization of large monumental structures with complex dynamic interactions. *Procedia engineering*, 2017, 199: 3344-3349.
- [11] CERAVOLO, Rosario, PECORELLI, Marica L., DE LUCIA, Giulia, 2018. *Monitoraggio del complesso monumentale regina montis regalis. Relazione annuale 2017*.

- [12] FABBROCINO, Giovanni; RAINIERI, Carlo; VERDERAME, G. M. L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti. In: *Proceedings of workshop su "Controllo e monitoraggio di edifici in ca: il caso-studio di Punta Perotti"* (in Italian), Bari, Italy. 2007.
- [13] VAN OVERSCHEE, Peter; DE MOOR, Bart. A unifying theorem for three subspace system identification algorithms. *Automatica*, 1995, 31.12: 1853-1864.
- [14] BRINCKER, Rune; ANDERSEN, Peter. Understanding stochastic subspace identification. *Proceedings of the 24th International Modal Analysis Conference, St. Louis, Missouri, USA*, 2006.
- [15] PECORELLI, Marica L.; CERAVOLO, Rosario; EPICOCO, Rodolfo. An automatic modal identification procedure for the permanent dynamic monitoring of the sanctuary of Vicoforte. *International Journal of Architectural Heritage*, 2018, 1-15.
- [16] CERAVOLO, Rosario, COLETTA, Giorgia, DE LUCIA, Giulia, MIRAGLIA, Gaetano, 2019. *Monitoraggio del complesso monumentale regina montis regalis. Relazione annuale 2018*.
- [17] LU, Ning; KAYA, Murat. Power law for elastic moduli of unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 140.1: 46-56.

Ringraziamenti

Giunta oramai al termine di questo percorso formativo ma soprattutto di vita, sento il bisogno di ringraziare chi mi ha permesso di arrivare fin qui.

Il primo ringraziamento va al mio relatore Prof. Rosario Ceravolo per avermi permesso di svolgere questo lavoro che mi ha stimolato, mi ha permesso di mettermi alla prova e di imparare tanto. Vorrei inoltre ringraziare tutti i ricercatori del laboratorio di Earthquake Engineering & Dynamics.

Un ringraziamento speciale va ai miei correlatori Ing. Gaetano Miraglia e Ing. Giorgia Coletta, non solo per il loro contributo professionale al mio lavoro di tesi, ma soprattutto per il loro sostegno personale, per avermi appoggiata ed aiutata sempre. Grazie per i professionisti e soprattutto per le belle persone che siete.

Questi anni a Torino sono stati probabilmente i più importanti della mia vita, quelli che più mi hanno resa la persona che sono ora e racchiuderli in poche righe è davvero complicato. Per farlo parto dal fare un ringraziamento generale, perché chiunque abbia incrociato sulla mia strada in questi anni mi ha aiutato ad arrivare qui.

Per me Torino è diventato con il tempo una seconda casa, e il Collegio è diventato la mia seconda famiglia. Grazie a Pino per essere stato il mio papa-amico, grazie a Marisa per essere stata il mio punto di riferimento, grazie a Noemi per avermi insegnato ad essere più 'leggera', grazie a Chiara per la tua allegria, grazie a Fausto per il tuo esserci, e grazie a Dario, Marco, Francesca, Danilo, Francesco e a tutta la famiglia dell'Einaudi per i pranzi, le cene, i pranzi di Natale, le matricolate, ma soprattutto per non avermi mai fatto sentire sola.

Devo invece ringraziare il tanto odiato Politecnico di Torino per avermi permesso di incontrare i miei compagni di viaggio. Grazie a Debora, Simone, Pasquale, Giulia e Giuseppe per gli esami preparati insieme, per i progetti, per le giornate passate in aula studio, per le risate e le incazzature. Semplicemente per esserci stati, perché senza di voi sicuramente non sarebbe stata la stessa cosa.

Grazie a Martina, perché anche se non ci sentiamo e vediamo ogni giorno so che ci sei, come si sei stata negli ultimi 25 anni, e che ci sarai, sempre.

Grazie alla mia famiglia, intesa in senso più largo, in particolare alle mie zie perché mi fanno sentire la loro vicinanza e so di poter contare sempre su di loro.

Grazie a Matteo, semplicemente perché da quasi 8 anni rendi la mia vita felice. Perché sei tutto quello che io non sono: positivo quando io sono negativa, leggero quando io sono pesante, determinato quando io sono arrendevole, perché credi in me anche nei momenti in cui io non ci credo, perché mi fai vedere il mondo da un altro punto di vista, perché mi comprendi soltanto guardandomi negli occhi. Se oggi sono qui è anche merito tuo.

Ma il ringraziamento più sentito va sicuramente ai miei genitori. Grazie per avermi sostenuta sempre, perché vi fidate di me, perché non mi imponete mai nulla e mi permettete di fare quello che desidero. Visto che non lo faccio spesso questa è l'occasione per dirvi quanto vi sia grata per tutto e quanto vi ami. Spero possiate essere sempre più orgogliosi di me.

Infine ringrazio me stessa, la mia testardaggine, la mia caparbia, perché questo percorso mi ha permesso di scoprire che in realtà non sono così debole e fragile come credevo, e mi ha dato maggiore consapevolezza di chi sono.

'La felicità non viene da un lavoro facile, ma dal bagliore di soddisfazione che appare dopo il raggiungimento di un compito difficile, che richiedeva il nostro meglio' (Theodore Isaac Rubin).