IL MONITORAGGIO STRUTTURALE

La Definizione del Piano Di Monitoraggio

Vincenzo Giannetto – Ingegnere, Legale Rappresentante Indagini Strutturali srl
Marika Volpe – Ingegnere, Indagini strutturali srl

INTRODUZIONE

Il Monitoraggio Strutturale e la definizione del Piano di Monitoraggio

L'attività di monitoraggio strutturale ha lo scopo di acquisire informazioni circa il comportamento di un manufatto e dell'ambiente che con esso interagisce. È abbastanza frequente che il progettista che opera sulle strutture esistenti debba affiancare alle attività di indagine strutturale vera e propria (prove sui materiali, rilievi geometrici e strutturali, etc.) ulteriori accertamenti che rientrano nella categoria dei monitoraggi. È possibile, infatti, riscontrare, fin dalle preliminari ricognizioni della struttura, stati di fessurazione la cui semplice osservazione, tuttavia, non consente di qualificarli come stabilizzati o in atto, con le rilevanti conseguenze che ne derivano. In questi casi il progettista si trova nella necessità di ricorrere ad attività di monitoraggio finalizzate ad osservarne la variazione di ampiezza nel corso di un prestabilito periodo di tempo, ovvero ricercarne le cause accertando, ad esempio, la presenza di vibrazioni indotte, degrado del materiale (espansioni), cedimenti del terreno di imposta delle fondazioni, etc.
L'esigenza di predisporre un monitoraggio può intervenire, inoltre, in un periodo intermedio della progettazione, come nel caso in cui il progettista voglia ricavare sperimentalmente lo stato tensionale di una porzione di struttura per confrontarla con quella che ha determinato con un sofisticato modello di calcolo, ovvero alla fine del processo progettuale, quando si ricerca una conferma sperimentale della bontà degli interventi progettati. Tornando all'esempio precedente, quando in presenza di un processo deformativo in atto si voglia accertare sperimentalmente che gli interventi di presidio progettati ne abbiano determinato la stabilizzazione.
Da queste brevi considerazioni è facilmente intuibile che la definizione di un *piano di monitoraggio* non è sicuramente meno complesso e articolato di quello relativo al *piano delle indagini*, anche perché, nel corso del tempo, possono modificarsi gli obiettivi della ricerca, come appare evidente nell'esempio appena citato.

In conclusione, la definizione di un piano di monitoraggio si articola nelle seguenti fasi:

a) **Definizione dei parametri di comportamento strutturale che occorre ricercare**. Questa fase può essere definita in un'unica occasione o ripetuta più volte nel corso dell'attività di progetto.
b) **Individuazione delle tecniche di monitoraggio più idonee allo scopo**. Ciascuna tecnica deve essere qualificata con le potenzialità/limitazioni/invasività del risultato ottenibile. Anche in questo caso si può arrivare a valutazioni di tipo diverso in relazione al caso specifico: ad esempio, alcune prove di misura dello stato tensionale richiedono esecuzioni di tagli di dimensioni relativamente grandi che possono essere effettuati senza rilevanti problemi in strutture massicce di muratura ma da adottare con grande cautela in quelle sottili o in calcestruzzo fortemente armato ove è grande il rischio di tagliare le barre d'armatura. Nel caratterizzare le varie tecniche non vanno trascurati i costi, la velocità d'esecuzione, la pratica operativa.
c) **Scelta delle tecniche di indagine**. Il Progettista, sulla scorta dei punti precedenti, definisce il piano di Monitoraggio stabilendone precisamente il tipo, il numero, l'ubicazione e le fasi temporali in cui eseguire le misure. In aggiunta, andrà anche scelta la frequenza con cui programmare le rilevazioni dei dati.

Pur essendo molto sottile la linea di demarcazione fra il Piano delle Indagini Strutturali ed il Piano di Monitoraggio, le due attività sono concettualmente assimilabili. Il Piano d'Indagine Strutturale si sviluppa di solito preliminarmente al Progetto, in quanto le relative determinazioni devono essere ripetute più volte nel corso di un certo periodo, anche protratto, d'osservazione, mentre il Piano di Monitoraggio si qualifica in modo particolare perché può essere sviluppato in momenti diversi dell'attività progettuale.
Quest'ultima esigenza, unitamente, talvolta, alla necessità di disporre delle relative informazioni in "tempo reale" ha portato a sviluppare sistemi d'acquisizione automatizzati che tuttavia sono applicabili solo, o più facilmente, ad alcune tecniche. Da qui un ulteriore elemento di valutazione che deve essere tenuto in debito conto dal progettista nella definizione del Piano di Monitoraggio. Appare quasi superfluo ribadire in questo caso l'utilità di una stretta collaborazione tra il Progettista e la Società incaricata d'eseguire il monitoraggio che potrà fornire quelle indicazioni tipicamente tecnologiche, informatiche, di trasmissione del dato, utili ad orientare la scelta verso le metodologie più idonee agli scopi.

Parametri da monitorare

I parametri strutturali di cui può essere necessaria la conoscenza sono molteplici: i più ricorrenti sono gli spostamenti, le deformazioni, lo stato tensionale, etc. Inoltre, con una certa frequenza, risulta anche necessario determinare le azioni, in senso ampio, cui la struttura è assoggettata; per tale ragione risultano significativi vari parametri ambientali come il vento, la temperatura, l'umidità, etc.

Di seguito si riporta un elenco di alcune stazioni di misura costituite da strumentazione idonea alla lettura delle principali grandezze fisiche suscettibili ad essere monitorate.

Parametri Strutturali - Stazioni di misura e strumentazioni che la compongono

Stazioni Lineari: sono costituite da trasduttori elettronici potenziometrici o capacitivi (fessurimetri) che vengono installati a cavallo di una lesione o di un giunto; dalla misura dell'allargamento o del restringimento dei due lembi, confrontata con la dimensione iniziale, si evince se il fenomeno è stabile o in evoluzione.

Stazioni Inclinometriche: sono costituite da trasduttori di rotazione che vengono installati lungo la sezione di cui si vogliono conoscere le rotazioni; dal confronto con la rilevazione iniziale se ne deduce l'entità delle rotazioni in ogni sezione.

Stazioni Accelerometriche: sono costituite da geofoni e/o da accelerometri che vengono installati in zone caratteristiche della struttura; dall'elaborazione dei segnali acquisiti si ricavano i principali modi di vibrare e/o la presenza di vibrazioni causa di disturbo.

Stazioni di misura di Forze, Pressioni, Tensioni: sono costituite da Celle di carico, Martinetti piatti, Trasduttori di Pressione, etc. per la misura di grandezze fisiche complesse che consentono di avere informazioni delle sollecitazioni agenti e sugli stati tensionali.

Parametri Ambientali - Stazioni di misura e strumentazioni che la compongono

Stazioni Termiche: sono costituite da sensori elettronici a semiconduttore che vengono installati nelle zone in cui si ritiene opportuno misurare l'andamento della temperatura ambientale; solitamente si utilizzano unitamente ad alcune stazioni di misura per la rilevazione dei parametri strutturali, per valutare se esiste, o meno, correlazione tra i dati strutturali e quelli ambientali.

Stazioni per Rilevazione Umidità: sono costituite da sensori digitali a semiconduttore in grado di rilevare, mediante un sensore capacitivo, l'umidità presente nell'aria circostante. Vengono utilizzate, solitamente, quando si ritiene necessaria una correlazione tra i parametri strutturali e quelli ambientali.

Stazioni Anemometriche: sono costituite da anemometri che consentono di misurare la velocità e la direzione del vento in modo da poter associare i valori rilevati con quei parametri strutturali che proprio da essi sono influenzati.

Stazioni Piezometriche: sono costituite da piezometri di appropriate caratteristiche che consentono di misurare il livello di falda al fine di comprendere se certi fenomeni di cedimento siano o meno associabili a caratteristiche idrogeologiche del terreno di fondazione.

In base alle modalità d'acquisizione dei dati è possibile distinguere le due diverse tecniche di monitoraggio.

1. **Tecniche di monitoraggio semplici**
   Consentono la misura diretta di ogni parametro posto in osservazione a prefissati intervalli di tempo costanti.
2. **Tecniche di monitoraggio complesse**
   Possiedono un trigger e consentono, quindi, la variazione dell'intervallo di tempo d'acquisizione prefissato al superamento di un determinato valore di soglia di alcuni parametri.

OGGETTO E FINALITÀ

Gli obiettivi del Monitoraggio Strutturale

Le attività da svolgere su ogni manufatto posto sotto monitoraggio hanno come obiettivo lo studio delle sue condizioni strutturali e soprattutto l'evoluzione del tempo dei parametri e delle grandezze fisiche tenute sotto osservazione.

Poiché, in generale, per una struttura esistente non si conoscono tutte le parti di ogni elemento strutturale che la costituiscono, e considerato che lo stato tensionale è radicalmente condizionato dalle fasi costruttive, non è facile fare una valutazione numerica affidabile. Di conseguenza, per superare questa difficoltà ed arrivare ad una stima e ad una gestione della sicurezza strutturale dell'immobile, si ricorre ad approcci sia di carattere strumentale che documentale. Viene, quindi, studiato ed applicato un piano di monitoraggio comprendente la misura dello stato tensionale in condizioni d'esercizio; accanto alla misura dei fenomeni deformativi degli elementi murari ritenuti più sensibili, condotta per un intero periodo significativo, viene avviata al tempo stesso un'analisi storico-documentale che permetta d'individuare gli elementi strutturali effettivamente portanti, escludendo quelle parti che, anche ad un rilievo conoscitivo, risulterebbero collaboranti.

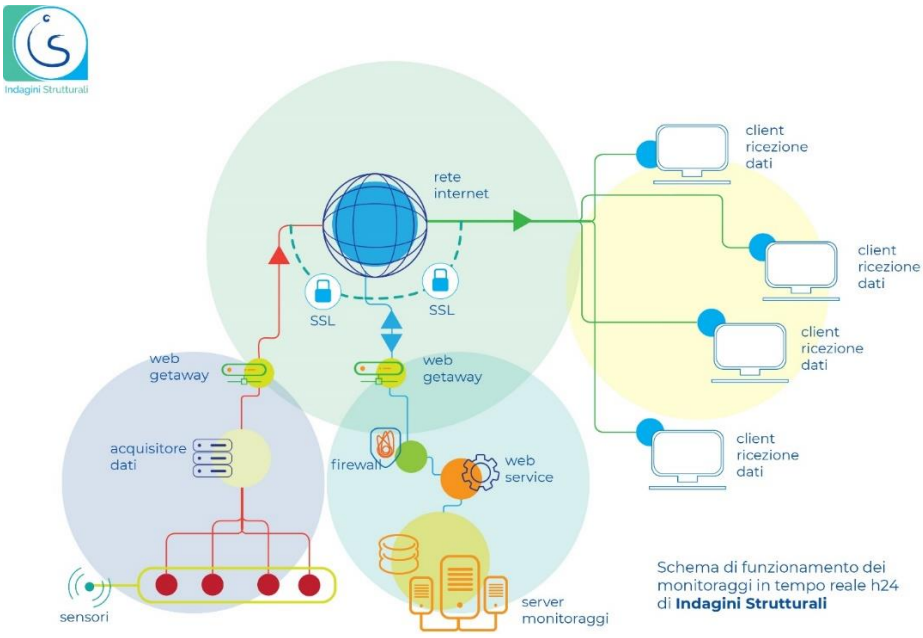
La valutazione della sicurezza dell'immobile dovrà essere attuata con delle misure sul corpo reale dell'edificio individuando gli elementi di rischio attraverso deformazioni anomale, che quantificano anche il livello di gravità, tramite la misura temporale della progressione di una data misura fisica.
A seguito dell'analisi preliminare riguardante le caratteristiche specifiche di un complesso immobiliare è, quindi, opportuna una pianificazione delle attività di studio e monitoraggio in grado di dare risposte oggettive e quantificabili sullo stato dell'immobile e sulle sue eventuali criticità.

L'analisi dei risultati ottenuti da un monitoraggio strutturale h24 in continua è utilizzata sia come un rilevatore di pericolosità che come elemento di valutazione delle condizioni strutturali dei manufatti su cui è installato.

Essa fa parte di un progetto ben più ampio, articolato in momenti successivi che prevedono le seguenti tre fasi operative e temporali.

1. L'**attivazione di un monitoraggio di sicurezza** il cui scopo consiste nel mettere a disposizione uno strumento d'immediato avviso di eventuali situazioni di attenzione con una prima valutazione del livello della sua pericolosità; al termine di questa prima fase occorre controllare che non siano state riscontrate situazioni di particolare pericolosità, in normali condizioni d'esercizio.
2. La **valutazione del livello di sicurezza del manufatto** la cui finalità è quella di determinare un valore parametrico che possa indicare in maniera chiara e sintetica lo stato di salute strutturale.
3. Un **monitoraggio di lungo periodo** che ha l'obiettivo di seguire i fenomeni degenerativi su più ampia scala, sia geometrica che temporale.

Per ognuna delle tre fasi di **monitoraggi di questo tipo** il periodo d'acquisizione predefinito con rilevazioni automatiche dei dati in continua avviene, normalmente, ad intervalli di mezz'ora l'uno dall'altro.
Esso costituisce la base di studio e di controllo del manufatto per gli anni a venire, costruendo la memoria stessa del medesimo.



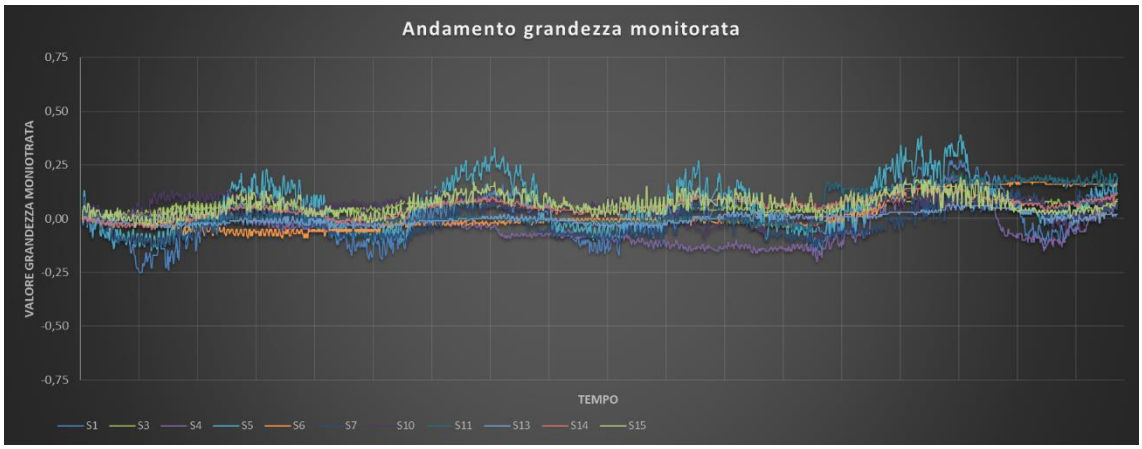
Schema di funzionamento dei monitoraggi in tempo reale h24 di **Indagini Strutturali**

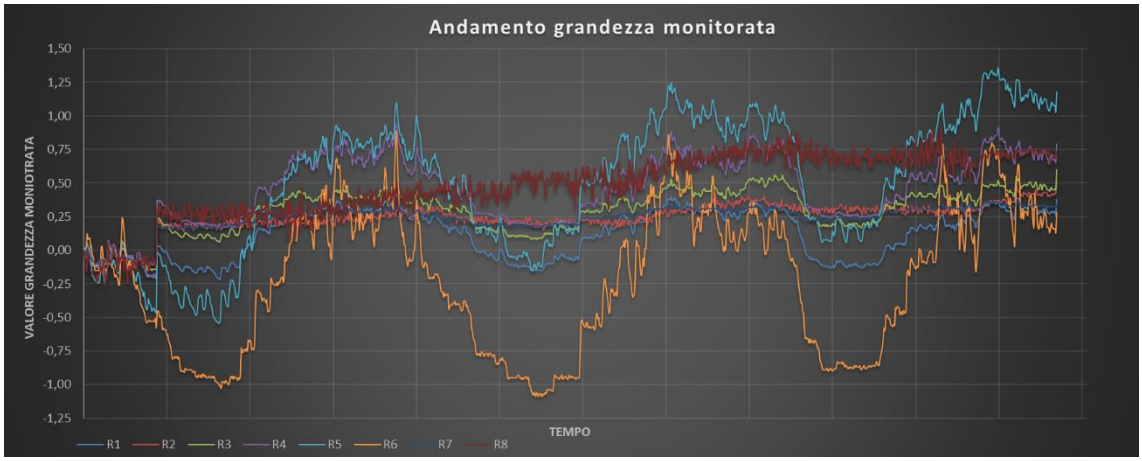
FASI OPERATIVE

Indagine visiva preliminare

Al fine di avere risposte significative a seguito di un monitoraggio, occorre individuare, tramite una capillare ed accurata indagine visiva dello stato delle strutture, quelle lesioni che per posizione ed ampiezza, oltre a destare la maggior preoccupazione, sono fra le più indicative nel dare valide e significative informazioni nell'eventualità di ampi fenomeni degenerativi che potranno anche interessare intere parti del corpo di fabbrica.
Su di esse vengono installati strumenti di misura capaci di registrare gli incrementi delle principali grandezze fisiche poste sotto osservazione, per poi trasmettere i dati in tempo reale all'unità d'acquisizione dati. Occorrerà, quindi, provvedere a rendere immediatamente disponibili e fruibili i rilevamenti, sia al personale incaricato all'interno dell'edificio che ai tecnici esterni, tramite un portale on line accessibile con apposite credenziali.

Vengono riportati qui di seguito, a titolo esemplificativo ed illustrativo, i grafici relativi all'andamento di alcuni parametri acquisiti nel corso di un intero periodo di monitoraggio.





Il passo successivo sarà quindi analizzare, uno per uno, i grafici dei singoli canali per ognuna delle grandezze fisiche poste sotto osservazione. Nell'analisi, le varie stazioni di misura saranno raggruppate in funzione del loro andamento ed inoltre, in ogni grafico, saranno presenti linee di diverso colore e forma (tratteggiate) che rappresentano lo zero di riferimento per il calcolo delle progressioni da prendere in considerazione.
Nelle pagine successive sono riportate le classificazioni di ogni curva costituente il diagramma generale e per ognuna di esse il metodo d'interpretazione e d'analisi.

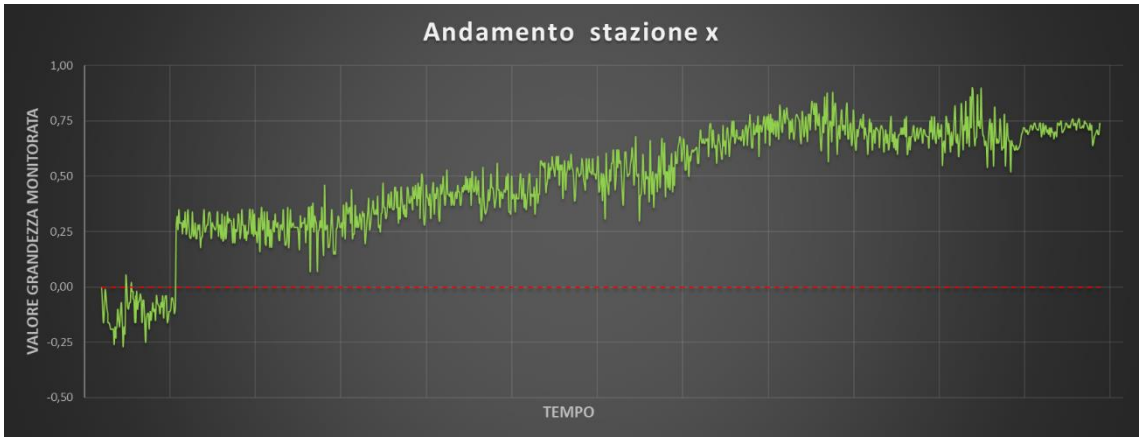
INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Tipologie di diagrammi

In linea di principio è possibile distinguere, sostanzialmente, 6 tipologie di diagrammi.

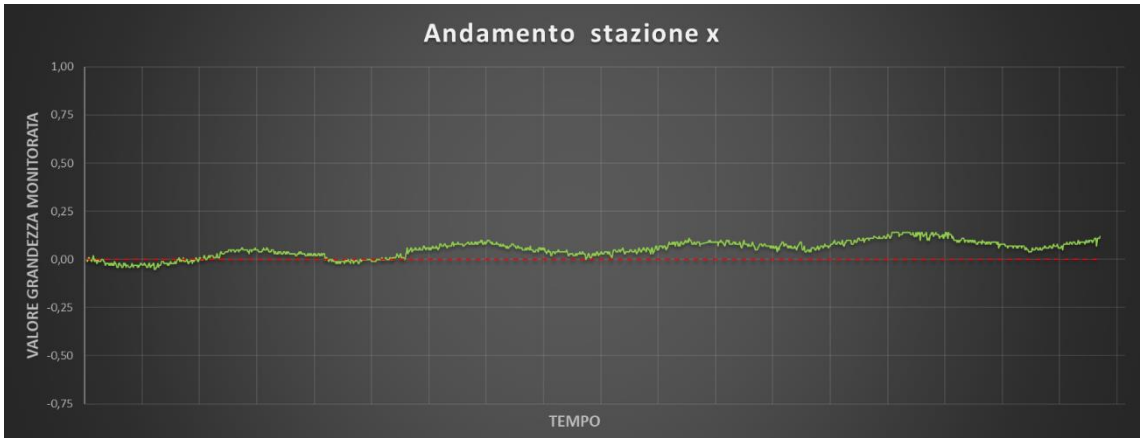
1. Progressioni positive significative
2. Stagionalità con elevata ampiezza di escursione
3. Stagionalità con ridotta ampiezza di escursione
4. Stagionalità con progressione positiva
5. Progressioni negative
6. Progressioni nulle

Progressioni positive significative: Il diagramma non presenta caratteristiche di "stagionalità" ed è caratterizzato da evidenti progressioni che indicano un'evoluzione del fenomeno in evidente stato d'avanzamento.



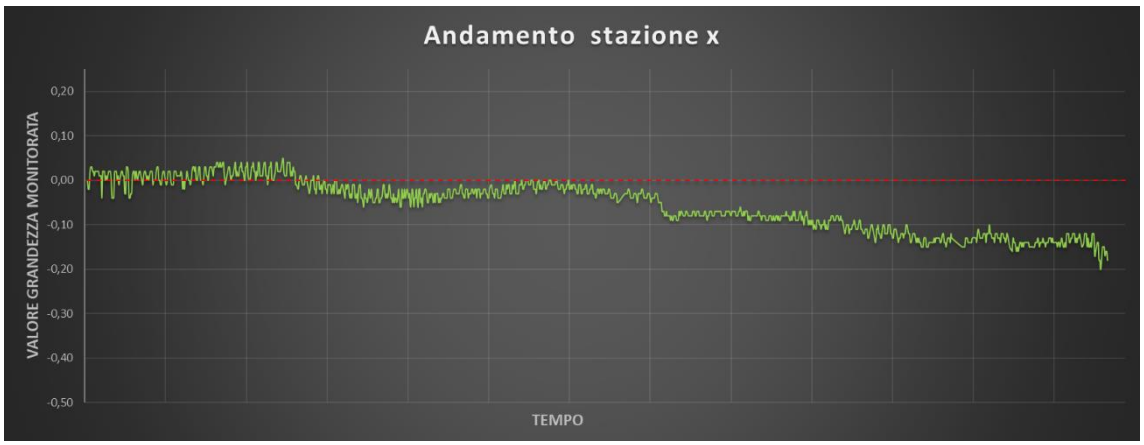
Stagionalità con elevata ampiezza di escursione: il diagramma non evidenzia progressioni ma stagionalità marcate quindi si ritiene operativo e significativo, almeno nel dare misura di un certo stato di alta deformabilità.

3 **Stagionalità con ridotta ampiezza di escursione**: il diagramma è caratterizzato da una regolarità stagionale con ridotta ampiezza di escursione, per cui si può considerare operativo e non riporta fenomeni degenerativi attivi.



4 **Stagionalità con progressione positiva**: il diagramma evidenzia stagionalità e progressione che indica un fenomeno in uno stato di evoluzione. Si è quindi in fase degenerativa.

5 **Progressioni negative**: il diagramma presenta una progressione negativa che indica un fenomeno in stato di involuzione; anche in questo caso, però, l'irregolarità generale raccomanda attenzione ed approfondimento.



6 **Progressioni nulle**: il diagramma evidenzia una progressione pressoché nulla che, quindi, indica un fenomeno stabile.

Dall'individuazione dei diversi gruppi di grafici, e quindi di comportamento, viene derivata una tabella finale riassuntiva utile a valutare a colpo d'occhio quanto di seguito elencato.

1. Nome del sensore
2. Ubicazione
3. Presenza o meno della stagionalità nell'andamento del segnale
4. Progressione del segnale rispetto ai valori registrati all'inizio del monitoraggio
5. Presenza o meno d'irregolarità nel segnale

Se ne riporta una a titolo d'esempio riferita ai 6 grafici sopra inseriti

• Progressioni positive significative
• Stagionalità con elevata ampiezza di escursione
• Stagionalità con ridotta ampiezza di escursione
• Stagionalità con progressione positiva
• Progressioni negative
• Progressioni nulle

Stazione	Ubicazione	Stagionalità	Progressione [mm]	Irregolarità
S x	Stanza1/Piano1	assente	+0,75	presenti
S x	Stanza2/Piano2	presente	0	presenti
S x	Stanza3/Piano3	presente	0	assente
S x	Stanza4/Piano4	presente	+0,50	presenti
S x	Stanza5/Piano5	assente	-0,20	presenti
S x	Stanza6/Piano6	assente	0	assente

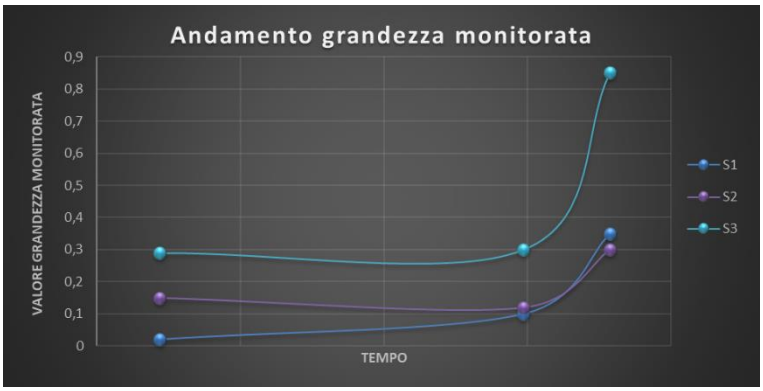
CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

Scopo di ogni monitoraggio è lo sviluppo di un'analisi numerica basata sui dati acquisiti, dando evidenza di situazioni anomale, di variazioni rispetto a valori precedenti, di ogni altro dettaglio che possa risultare utile ai fini dell'interpretazione dei fenomeni in atto. Vengono pertanto elaborate tabelle riepilogative, come quella riportata qui di seguito, che tiene conto di quanto rilevato.

PROGRESSIONE GRANDEZZA MONITORATA			
STAZIONE	**RESOCONTO 1**	**RESOCONTO 2**	**RESOCONTO 3**
S1	0	0	0
S2	+1,2	+0,9	+0,8
S3	+0,02	+0,02	+0,02
S4	-0,12	-0,13	-0,15
S5	+0,05	+0	0
S6	-0,05	-0,03	-0,05
S7	0	0	0

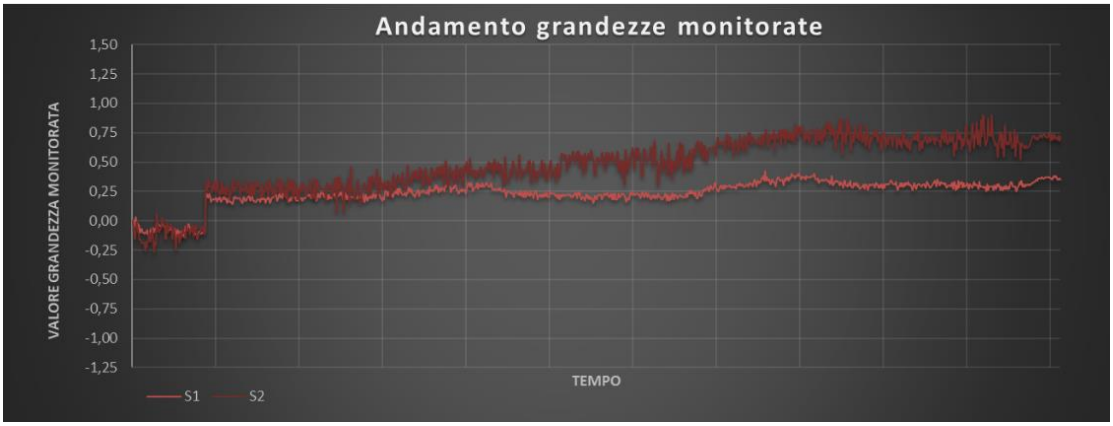
Durante il periodo di monitoraggio si potranno verificare diverse situazioni; di seguito se ne riportano alcune a titolo d'esempio.

1. I dati rilevati denotano, per le grandezze monitorate, un'evidente tendenza di crescita nell'ultimo periodo.

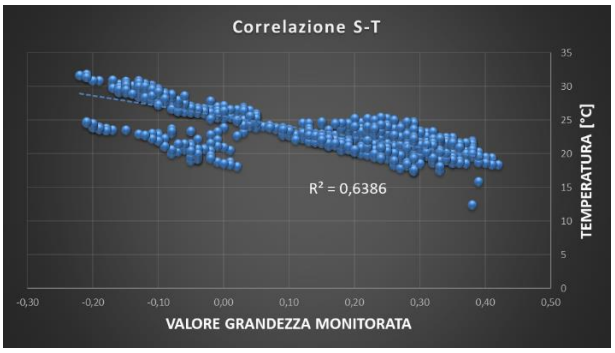


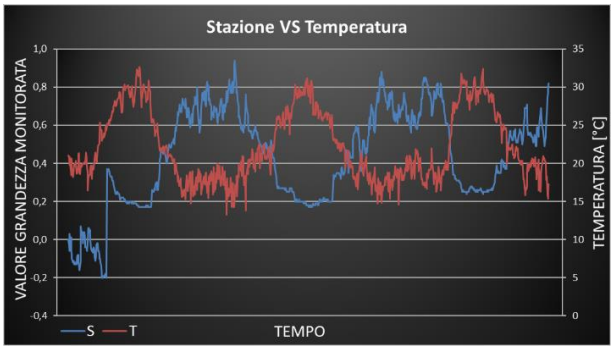
2. A differenza di quanto evidenziato nel grafico precedente, si osserva l'inversione di un trend crescente registrato nelle fasi iniziali del diagramma.

3. I sensori, disposti su due lesioni diverse, hanno lo stesso andamento. Questo comportamento è sinonimo di movimenti rigidi.

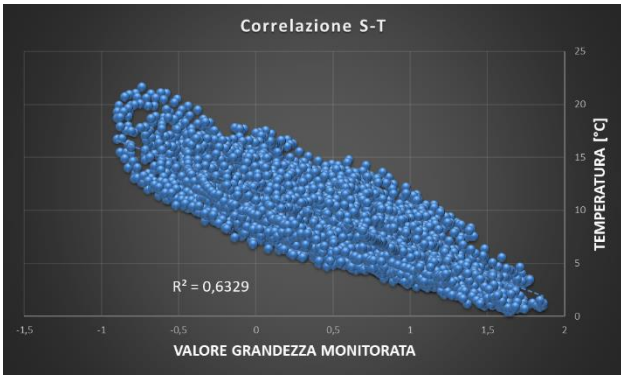


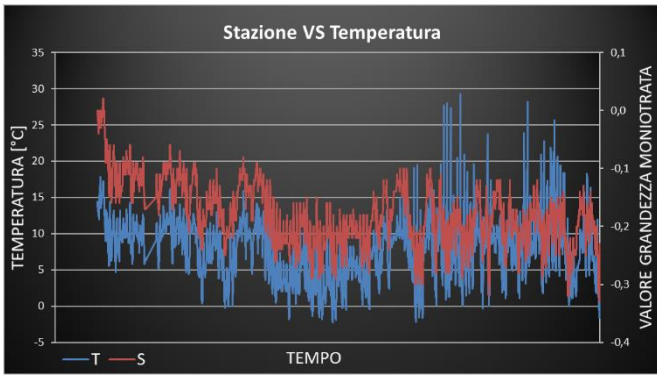
4. Dall'analisi delle singole grandezze è opportuno verificare se queste sono influenzate, o meno, dalla variazione di temperatura.



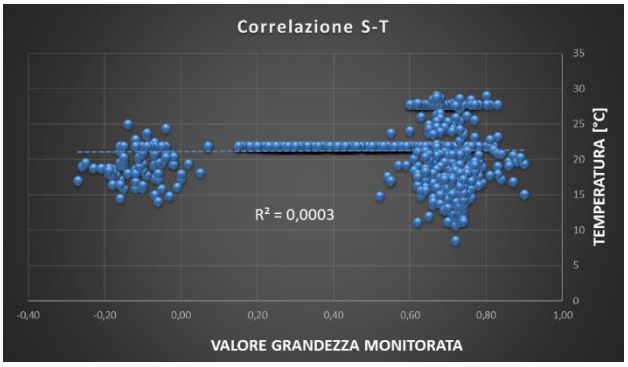


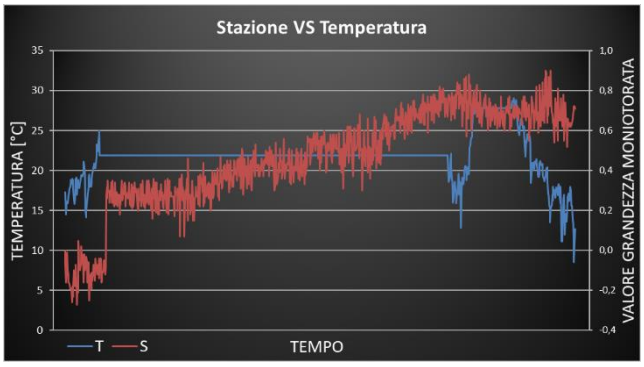
Dai grafici e dal valore del *coefficiente di determinazione* R^2 (il valore R^2 è compreso tra 0 e 1; più esso si avvicina al valore 1 e più i dati sono correlati tra di loro) la grandezza risulta correlata alla temperatura. Come si vede dal secondo grafico, effettivamente, l'andamento della grandezza S ha una buona correlazione con l'andamento della temperatura T. In particolare, i due viaggiano in controfase: la grandezza diminuisce all'aumentare della temperatura e aumenta al diminuire di questa.





Dai grafici e dal valore del *coefficiente di determinazione* R^2 (il valore R^2 è compreso tra 0 e 1; più esso si avvicina al valore 1 e più i dati sono correlati tra di loro) la grandezza risulta correlata alla temperatura. Come si vede dal secondo grafico, effettivamente, l'andamento della grandezza S ha una buona correlazione con l'andamento della temperatura T. In particolare, i due viaggiano in fase: la grandezza aumenta all'aumentare della temperatura e diminuisce al diminuire di questa.





Dai grafici e dal valore del *coefficiente di determinazione* R^2 (R^2 è compreso tra 0 e 1; più esso si avvicina al valore 1 e più i dati sono correlati tra di loro) la grandezza non risulta correlata alla temperatura. Come si vede dal secondo grafico, effettivamente, l'andamento della grandezza S non ha alcuna correlazione con l'andamento della temperatura T.

CONCLUSIONI

La necessità di ricorrere ad un monitoraggio strutturale si manifesta quando sono evidenti gli indizi di una perturbazione delle condizioni di "equilibrio" di un manufatto che può avere cause diverse. In linea generale, le più ricorrenti sono:

1. Rilevanti modifiche dei carichi applicati (sopraelevazioni, modifiche della destinazione d'uso, etc.)
2. Insorgere di forti vibrazioni e scuotimenti
3. Importante degrado delle parti strutturali
4. Presenza di importanti quadri fessurativi ed inclinazioni anomale
5. Variazioni delle condizioni geotecniche/idrauliche

Come prima cosa è opportuno precisare l'importanza di attivare un monitoraggio strutturale, in tutti quei casi in cui l'evoluzione delle grandezze sotto osservazione risulti ancora in fase embrionale. Infatti, studiando ed analizzando bene le curve una per una, il monitoraggio permette di agire in assoluta prevenzione in quanto è possibile leggere importanti fenomeni degenerativi ancor prima che questi si manifestino con, ad esempio, vistosi e pericolosi quadri fessurativi.
L'analisi dei grafici delle singole curve, consentendo di evidenziare le caratteristiche di ognuna di esse, mostra se la staticità dell'edificio sia influenzata, o meno, da fenomeni stagionali, con escursioni più o meno ampie.
Viene messa in risalto, in alcune circostanze, la congruenza fra andamenti di diverse stazioni e quindi la presenza di movimenti rigidi.
Relativamente alla sua durata è possibile affermare che il periodo d'osservazione deve essere tale da far comprendere la dimensione del fenomeno e l'entità dei movimenti che si sono sviluppati. È inoltre opportuno precisare che un'attività di questo genere richiede periodi d'osservazione relativamente lunghi, mai inferiori ai 12-18 mesi, che tengano conto anche di possibili fenomeni stagionali d'inversione termica.
Generalmente, un monitoraggio s'intende concluso positivamente quando il valore finale delle grandezze monitorate è molto simile a quello iniziale per cui, dall'analisi dei dati si potrà giungere alla conclusione che i movimenti strutturali risultano esauriti e, quindi, la struttura abbia raggiunto un regime di piena stabilizzazione.
Nel caso in cui non si sia raggiunta la stabilizzazione, e che non si siano individuati chiari fenomeni di entità tale da suggerire nell'immediato interventi locali o generalizzati che possano migliorare la situazione statica dell'intero immobile, il monitoraggio dovrà proseguire in maniera da avere, a fronte di una mole più elevata di dati, maggiori informazioni sulla reale situazione statica.
È infine utile chiarire che, quando un monitoraggio non può ritenersi concluso, un ulteriore periodo d'osservazione è utile a:

a) verificare che non ci siano importanti evoluzioni di fenomeni deformativi e/o degenerativi e circoscriverli immediatamente, qualora ci fossero
b) determinare e misurare eventuali ulteriori gradienti deformativi, approfondendone durata ed intensità;
c) consentire con tempestività l'individuazione dei necessari provvedimenti da assumere per prevenire fenomeni d'instabilità strutturale.

Roma, 09 aprile 2020

Indagini Strutturali

Ing. Vincenzo Giannetto
enzogiannetto@indaginistrutturali.it
cell. 335 6270044

Ing. Marika Volpe
marikavolpe@indaginistrutturali.it
cell. 347 2553378

Indagini Strutturali srl
Via Guido de Ruggiero, 5 - 00142 Roma
Tel. 06.54602628 - Fax 06.54074980
info@indaginistrutturali.it
www.indaginistrutturali.it

R.E.A. n. 1155580 - Cap. Soc. € 25.000,00 i.v.
P.I. e C.F. 09316841007 - CID: M5UXCR1