

# Monitoring Design: linee guida minimali per una progettazione sostenibile

---

AUTORI: <sup>1</sup>Federico Innocca, <sup>1</sup>Giorgio Consentino, <sup>1</sup>Marco Baleani, <sup>1</sup>Simone Ridolfi, <sup>2</sup>Michele De Carlo.

<sup>1</sup>NHAZCA S.r.l., Start-up Sapienza University of Rome, Via Vittorio Bachelet 12, Rome

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Sapienza University of Rome, Piazzale A. Moro 5, Rome

## INCIPIIT

*Il progressivo aumento del volume d'affari nel campo del monitoraggio geotecnico e strutturale rappresenta un'occasione da cogliere o un fattore limitante? Questa è una questione che deve essere necessariamente attenzionata per capire al meglio quale sia la giusta direzione da intraprendere nell'ambito di una progettazione di un sistema di monitoraggio. Certamente l'incremento in termini economici delle risorse a disposizione può rappresentare un motore fondamentale per lo sviluppo scientifico e tecnologico delle strumentazioni e dei sensori disponibili ma, allo stesso tempo, bisogna considerare che il progresso deve essere accompagnato dalla giusta formazione e preparazione. Risulta dunque fondamentale, di fronte al crescente sviluppo di tecniche innovative, razionalizzare e concretizzare la visione e la scelta della strumentazione ed effettuare una pianificazione e progettazione sostenibile del monitoraggio.*

## 1. I principi del monitoraggio: dal metodo osservazionale ad oggi

“Il monitoraggio è l'osservare e controllare il progresso o la qualità di qualcosa per un periodo di tempo; tenere sotto revisione sistematica” [7]. Il concetto di monitoraggio periodico delle proprietà dinamiche e strutturali di un'opera nasce negli anni '60 grazie alla definizione del metodo osservazionale proposto da Terzaghi (1959) ed introdotto formalmente da Peck (1969). In applicazione dei principi definiti da Peck, il “Piano di monitoraggio” dovrebbe comprendere, entro i limiti economici e logistici del singolo caso, il controllo delle principali grandezze da misurare che il modello è in grado di prevedere, così da consentire nella maniera più completa possibile il confronto tra le previsioni e le misure di cantiere. Il confronto tra le previsioni di progetto e le misure monitorate durante l'iter costruttivo (soprattutto nella fase iniziale dei lavori) consente di apportare modifiche all'opera per mitigare o annullare gli effetti di eventi imprevisi. Il metodo osservazionale, dunque, si basa sui principi di “osservazione” e “apprendimento” (noto come “*learn as you go*”), con la finalità di rivedere continuamente la progettazione, migliorandola, durante la fase di costruzione di un'opera, evitando così impatti negativi sulle risorse economiche e tutelando le condizioni di sicurezza [2][3][4].

A partire dagli anni 60, grazie all'avvento di nuovi strumenti, sono state notevolmente rivalutate l'importanza e le potenzialità del monitoraggio: con lo sviluppo del data-logger dagli anni '70 è stato possibile acquisire dati in continuo e in maniera automatica, poi dagli anni '90 lo sviluppo dei protocolli per il controllo remoto e la trasmissione a distanza di dati hanno reso possibile il monitoraggio da remoto. Ad oggi esistono numerose tecnologie impiegate per il monitoraggio geotecnico e strutturale che spaziano da strumenti

“semplici” ad infrastrutture di monitoraggio complesse che si avvalgono delle più recenti tecnologie nel campo dell’intelligenza artificiale e del machine learning (Fig. 1).

Stressmeter							
Levelling			Continuous Monitoring				
Theodolite			US standards	Early Warning Monitoring	European Standards	Digital Image Correlation	BIM
Extensometer	Vibration Monitoring		Total Station	GSM data trasmission	Laser Scanner	Drones	Artificial Intelligence
Piezometer	Submarine Monitoring	Data-logger	Time Domain Reflectometry	Fibre Optics technology	Multi-parametric borehole systems	Web based data management	Machine learning
Load cell	Inclinometer	Laser Distancemeter	In place inclinometers	GNSS Technology	Interferometric Radar Technology	Wireless monitoring	Monitoring - Modelling Combination
1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s...

**Figura 1 - Impiego delle diverse strumentazioni per il monitoraggio dagli anni '50 al 2020 (modificato da Mazzanti, 2017).**

Gli strumenti per il monitoraggio geotecnico possono essere distinti in due categorie principali: "a contatto" e "a distanza" (Fig. 2). I primi vengono installati direttamente sul sito o sulla struttura che si desidera monitorare mentre gli altri operano da remoto, non richiedendo tale contatto in quanto si basano principalmente su sensori attivi e passivi che operano nel campo delle onde elettromagnetiche [2]. I metodi di monitoraggio a contatto sono oggi largamente utilizzati per via della loro storia più lunga (Fig. 1) e della capacità di misurare tutti i principali parametri geotecnici (spostamento, vibrazioni ed emissioni acustiche, pressione dell’acqua interstiziale, sforzo in terreni e rocce, carichi, deformazioni e temperature). L’utilizzo di strumenti di monitoraggio da remoto in campo geotecnico risale a tempi più recenti e, nonostante ne sia ormai comprovata l’efficacia, la loro applicazione non è sempre considerata uno standard. Tuttavia, soprattutto negli ultimi anni, l'utilizzo dei metodi remoti sta vedendo una drastica crescita. Vale la pena ricordare che, a differenza dei metodi di contatto, i principali metodi da remoto sono in grado di misurare solamente spostamento, vibrazioni e temperatura superficiali di una struttura (Fig. 2).

Parameters	Contact instruments	Remote instruments
<b>Displacement (deformation)</b>	Surface and probe Tiltmeter, Inclinometer, Extensometer, Liquid Level Gauge, Crack Gauge, TDR, Fibre Optic, Pendulum, Deflectometer, Convergence Gauge	GNSS, Total Station, Optical Levelling, Lidar, Satellite SAR Interferometry, Terrestrial Interferometric Radar, Digital Image Correlation, Photogrammetry
<b>Vibration</b>	Accelerometer, Velocimeter,	Terrestrial Interferometric Radar, Digital Image Correlation
<b>Acoustic emission</b>	Seismometer, Geophone	
<b>Groundwater pressure</b>	Piezometer, Observation Well	n. a.
<b>Stress</b>	Earth Pressure Cell, Stress-meter	n. a.
<b>Load &amp; Strain</b>	Load Cell, Strain Gauge	n. a.
<b>Temperature</b>	Thermometer, Thermocouple	InfraRed Camera

**Figura 2 – Nella tabella sono riportati gli strumenti da contatto e da remoto e i relativi parametri che sono in grado di osservare: spostamento, vibrazioni, emissioni acustiche, pressione interstiziale, sforzi, carichi e deformazioni e temperature (Mazzanti, 2017).**

## 2. Dove nasce la necessità di monitorare?

Il monitoraggio geotecnico e strutturale nasce dall'esigenza di tenere sotto controllo l'evoluzione di determinati scenari che possono comprendere, per esempio, edifici e infrastrutture, argini, pendii, scogliere, gallerie, dighe, fondazioni, strutture di contenimento in terra, sistemi di drenaggio, terreni bonificati e rivestimenti costieri.

Per quanto riguarda le strutture è ben noto che nel tempo tutte le costruzioni vengono interessate da un certo grado di decadimento strutturale. Un'opera geotecnica, infatti, evolve durante il ciclo di vita nominale manifestando difetti o deterioramenti che nel tempo possono aggravarsi e restituire un calo della funzionalità dell'opera stessa. Il deterioramento delle caratteristiche strutturali può portare alla necessità di intervenire al fine di contenere il danno o, in casi estremi, evitare la demolizione e ricostruzione. Un esempio di questo sono le costruzioni realizzate nel dopo guerra ed arrivate alla fine del proprio ciclo di vita utile. Le attività di monitoraggio geotecnico consentono di allungare il ciclo vitale della costruzione oltre che prevenire malfunzionamenti e necessità di interventi. Si tratta quindi di un investimento sul futuro secondo il principio per cui "prevenire è meglio che curare". Un altro aspetto fondamentale del monitoraggio riguarda gli eventi naturali come frane e inondazioni. Per fare un esempio, l'impatto drammatico del cedimento delle "infrastrutture" geotecniche lungo i viadotti è stato ampiamente dimostrato, sia dal punto di vista della sicurezza che dal punto di vista economico: considerando sia i beni materiali che non, una singola frana lungo una strada nazionale in un paese sviluppato può causare perdite che vanno da pochi milioni fino a varie centinaia di milioni di dollari USA. Nel 2009, frane sulla I-40 nella Carolina del Nord e sulla US-64 nel Tennessee provocarono la chiusura di quasi sei mesi di vari tratti stradali con una perdita di trasporto totale stimata nell'ordine di 200 milioni di dollari USA [6]. È stato inoltre dimostrato che spesso il costo della mitigazione del rischio è significativamente inferiore all'impatto economico di un guasto: *Perri et al. (2003a-b)* [4] hanno stimato che il costo medio dei guasti può essere da quattro a cinque volte superiore al costo per la mitigazione e la prevenzione.

Al fine di gestire al meglio le opere geotecniche, sia in fase di costruzione che di operatività delle opere stesse, il monitoraggio geotecnico gioca un ruolo chiave nella gestione del rischio e nella prevenzione di eventi imprevisti. Un corretto monitoraggio delle opere geotecniche restituisce un dato che a sua volta può essere tradotto come informazione utile per intraprendere e attuare scelte operative. Le attività di monitoraggio possono essere implementate in ognuna delle fasi del ciclo di vita di un'opera. In base a questo, si possono suddividere tre categorie di monitoraggio differenti (Fig. 3):

1. **Monitoraggio conoscitivo** (*Knowledge Monitoring*): ascrivibile alla fase di progettazione, è finalizzato alla caratterizzazione dell'area in esame e degli eventuali rischi connessi. Lo scopo del monitoraggio conoscitivo è quello di testare e valutare quantitativamente le prestazioni delle "opere" geotecniche in condizioni operative ordinarie. Questo tipo di monitoraggio può consentire di identificare e localizzare aree sconosciute interessate da potenziali criticità, dando così supporto alla prioritizzazione degli interventi. La complessità di questa tipologia di monitoraggio è data molto spesso dalla necessità di indagare aree molto estese.
2. **Monitoraggio di controllo** (*Control Monitoring*): applicabile alla fase di costruzione, ha lo scopo di seguire costantemente e quantitativamente l'evoluzione di fenomeni connessi con l'infrastruttura per gestirne il rischio. Durante questa fase risulta importante ottenere un'elevata risoluzione spaziale ovvero un alto numero di punti di informazione a "terra" caratterizzati da un'alta precisione. Il monitoraggio di controllo è probabilmente quello più utilizzato nella gestione delle opere geotecniche inerenti ai trasporti. Il monitoraggio di controllo può avvalersi di ogni tipo di sensore o

strumento di monitoraggio e può essere continuo o discontinuo nel tempo a seconda del problema da indagare.

3. **Monitoraggio di emergenza (Emergency Monitoring):** applicabile anch'esso alla fase di costruzione ma anche a quella di attività di un'opera, è finalizzato a fornire avvisi e allarmi quando un rischio già noto diventa inaccettabile. In questo caso il monitoraggio dovrà garantire l'acquisizione di dati accurati ed una elevata risoluzione temporale. L'uso del monitoraggio di emergenza è in aumento, grazie alle capacità delle nuove apparecchiature di monitoraggio in termini di rapidità nella raccolta, elaborazione e trasmissione dei dati. Lo scopo del monitoraggio di emergenza è controllare continuamente gli elementi sensibili e fornire un allarme (spesso automatico) nel caso in cui il rischio superi determinate soglie definite solitamente in fase progettuale. L'affidabilità del sistema di monitoraggio deve essere molto elevata e per questo motivo e le reti di monitoraggio sono preferibili a strumenti singoli per garantire il funzionamento continuo ed evitare falsi allarmi.

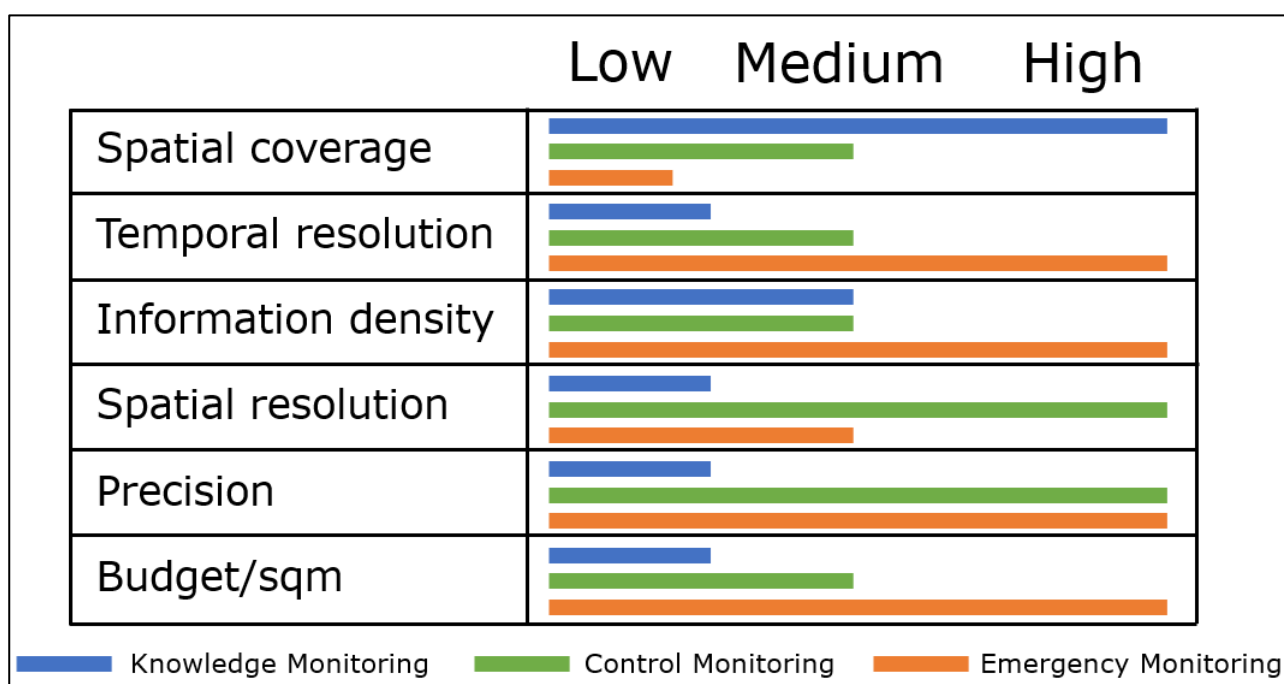
A parità di aree indagate il costo del monitoraggio risulta generalmente crescente passando da un monitoraggio conoscitivo a un monitoraggio d'emergenza.

	Common applications	Common instruments
<b>Knowledge monitoring</b>	Design phase	LiDAR, Satellite SAR Interferometry, Terrestrial Interferometric Radar, GNSS, Photogrammetry, Observation Well, Piezometer, Inclinator, TDR, Earth Pressure Cell, Accelerometer, Velocimeter, Seismometer
	Standard maintenance	
	Screening after paroxysmal events (Earthquakes, floods, etc.)	
<b>Control monitoring</b>	Construction phase in medium risk areas	LiDAR, Satellite SAR Interferometry, Terrestrial Interferometric Radar, GNSS, Photogrammetry, Total Station, Optical Levelling, Digital Image Correlation, Observation Well, Piezometer, Inclinator, TDR, Extensometer, Earth Pressure Cell, Stress-meter, Load Cell, Strain Gauge, Fibre Optic, Pendulum, Deflectometer, Convergence Gauge, Surface and probe Tiltmeter, Liquid Level Gauge, Crack Gauge, Accelerometer, Velocimeter, Seismometer
	Advanced maintenance (critical segments)	
	Verification of high risk area	
<b>Emergency monitoring</b>	Construction phase in high risk areas	LiDAR, Terrestrial Interferometric Radar, GNSS, Total Station, Piezometer, Inclinator, Extensometer, Strain Gauge, Fibre Optic, Pendulum, Surface and probe Tiltmeter, Liquid Level Gauge, Crack Gauge, TDR, Convergence Gauge, Accelerometer, Velocimeter, Seismometer
	Early warning system for operation in high risk areas	

**Figura 3** – Vengono riportati i diversi strumenti che meglio si adattano alle esigenze per una determinata applicazione e un certo tipo di monitoraggio tra conoscitivo, di controllo e d'emergenza (Mazzanti, 2017).

Come visto in precedenza, il crescente sviluppo di soluzioni e tecnologie innovative, a partire dagli anni '50 del secolo scorso, da quelle più tradizionali prevalentemente a contatto fino a quelle satellitari di tipo SAR e GNSS, ha fatto sì che per ogni fase del monitoraggio sia possibile definire la strumentazione più adatta per rispondere alle differenti esigenze. Negli ultimi anni, in particolare, trovano sempre più impiego le tecniche di monitoraggio radar interferometriche (SAR sia satellitari che terrestri), le tecniche LiDAR che si avvalgono dell'utilizzo della tecnologia Laser e le tecniche di Photomonitoring<sup>TM</sup> che fanno uso di immagini ottiche. Queste diverse tecnologie consentono di operare monitoraggi in maniera indipendentemente dalle condizioni di illuminazione o atmosferiche nel caso dell'interferometria SAR terrestre, di avere un'elevata densità di informazione nel caso degli strumenti LiDAR e di rilevare spostamenti sub-millimetrici a distanza con un costo contenuto nel caso del Photomonitoring<sup>TM</sup>. Queste diverse caratteristiche, proprie della

tecnologia che sta dietro uno strumento, rendono quest'ultimo più o meno idoneo ad un certo tipo di monitoraggio. Differenti monitoraggi prevedono quindi differenti strumenti e differenti costi del monitoraggio stesso (Fig. 4): un **monitoraggio conoscitivo** monitora parametri di cui non si conoscono i cambiamenti e, generalmente, necessita di indagare aree vaste. In questo contesto le metodologie di remote sensing, quali ad esempio le tecnologie Laser e Radar, si rivelano altamente efficaci. Con un **monitoraggio di controllo**, dove si conoscono già i parametri da monitorare, risultano particolarmente adatti tutti gli strumenti caratterizzati da un'elevata risoluzione spaziale e un'elevata precisione, come inclinometri, piezometri, termometri, sistemi radar terrestri, sistemi laser terrestri e Photomonitoring<sup>TM</sup>. Con il **monitoraggio d'emergenza** risulta essenziale disporre di un'elevata risoluzione temporale per poter monitorare in tempo quasi reale i parametri indagati, un'alta densità di informazione ed una precisione elevata. Queste necessità identificano gli strumenti radar terrestri come una delle migliori opzioni nel caso del monitoraggio di spostamenti, dato che consentono l'acquisizione di dati ad alta precisione con elevata frequenza di campionamento di giorno e di notte. Con il monitoraggio conoscitivo i costi possono tenersi generalmente bassi, in alcuni casi, limitati alla sola interpretazione del dato. Per i monitoraggi di controllo o di emergenza i costi aumentano a causa della richiesta di maggiori informazioni in tempi anche molto stretti.



**Figura 4** – È mostrato il diverso impatto di parametri come la copertura spaziale, la risoluzione temporale, la densità di informazione, la risoluzione spaziale, la precisione e il costo per m<sup>2</sup> sulle attività di monitoraggio in funzione della tipologia di quest'ultimo.

Appare evidente come differenti tipologie di monitoraggio abbiano caratteristiche differenti e conseguentemente anche dei costi differenti. Risulta quindi importante, al fine di effettuare delle attività di monitoraggio tenendo in considerazione rapporto costi/benefici, pianificare e programmare le attività prendendo consapevolezza del problema indagato, di cosa si vuole osservare, delle condizioni al contorno e degli strumenti necessari al monitoraggio. A volte capita purtroppo che si inizino delle campagne di monitoraggio geotecnico andando a monitorare numerosi parametri ma senza andare a rispondere ad una domanda specifica. Questo si traduce in un monitoraggio incontrollato e poco efficiente che, senza avere una questione specifica da risolvere, non consente una scelta opportuna delle strumentazioni.

### 3. Criteri di pianificazione del monitoraggio

La celebre frase di Dunnycliff *“Every instrument on a project should be selected and placed to assist with answering a specific geotechnical question: if there is no question, there should be no instrumentation”* (“Ogni strumento su un progetto dovrebbe essere selezionato e posizionato per aiutare a rispondere a una specifica domanda geotecnica: se non c'è una domanda, non ci dovrebbe essere nessuna strumentazione”) evidenzia la necessità di delineare e progettare di un piano di monitoraggio che prenda in considerazione una serie di requisiti.

La pianificazione di un programma di monitoraggio geotecnico dovrebbe procedere attraverso una serie di fasi da definire prima dell'inizio dei lavori sul campo. Di seguono vengono proposti 11 step utili ad una pianificazione sistematica del programma di monitoraggio (Dunnycliff, 2017 [1] e Mazzanti, 2017 [2]):

- Fase 0. Stima del budget disponibile;
- Fase 1. Definizione delle domande a cui rispondere;
- Fase 2. Definizione delle condizioni del progetto;
- Fase 3. Previsione dei meccanismi di controllo del comportamento;
- Fase 4. Identificazione, analisi, allocazione e pianificazione del controllo dei rischi;
- Fase 5. Selezione dei parametri da monitorare;
- Fase 6. Previsione dell'entità del cambiamento;
- Fase 7. Progettazione delle specifiche degli strumenti;
- Fase 8. Selezione della posizione degli strumenti;
- Fase 9. Analisi del budget;
- Fase 10. Revisione sistematica durante le fasi di monitoraggio, di implementazione e di costruzione.

Questi passi fungono da guida generale per la progettazione delle attività di monitoraggio, consentendo di prendere atto di più elementi che, uniti assieme, vanno a canalizzare la disponibilità economica unicamente su ciò che realmente serve. Con gli step appena introdotti si va preliminarmente a definire un budget iniziale, si definisce il problema da risolvere o indagare, poi le condizioni al contorno dell'area indagata; quindi, la definizione dei parametri che si intende osservare e gli strumenti più idonei per farlo e infine si verifica la disponibilità di budget per il mantenimento del sistema di monitoraggio e la sua manutenzione. Grazie al monitoraggio sarà possibile prendere delle scelte esecutive in funzione delle domande definite in partenza (Fig. 4).

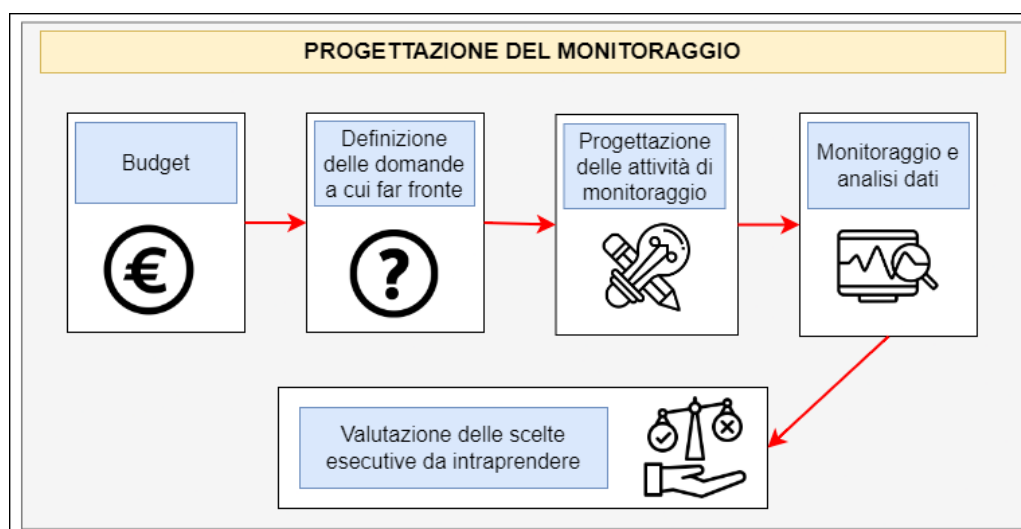


Figura 4 – Schema concettuale delle fasi di progettazione del monitoraggio.

Durante l'attività di progettazione del monitoraggio è necessario considerare anche la scala alla quale si esegue l'indagine, l'intervallo di tempo inerente alla durata del monitoraggio e se l'acquisizione del dato si configura come continua o come periodica.

La **scala del monitoraggio** varia a seconda di ciò che si va ad indagare. Un monitoraggio a piccola scala comprenderà, per esempio, la singola frattura centimetrica su un'opera geotecnica mentre, a grande scala, si monitorerà un viadotto di centinaia di metri. Generalmente il monitoraggio effettuato su soggetti di pochi millimetri, centimetri, metri o decimetri sono considerati a piccola scala mentre, monitoraggi su elementi di centinaia di metri, chilometri o decine di chilometri sono considerati a grande scala.

Il **periodo del monitoraggio** si può suddividere in lungo e breve termine: un monitoraggio a breve termine avrà una durata complessiva di minuti, ore, giorni o mesi mentre, un monitoraggio a lungo termine durerà anni o decenni. Nel lungo termine occorre una durabilità e resistenza dell'attrezzatura di monitoraggio che consenta di mantenere il monitoraggio attivo per lunghi periodi. Differentemente, nel breve termine, non si necessita di attrezzature particolarmente durevoli. Per quanto riguarda la frequenza temporale di acquisizione, solitamente, per il corto termine deve essere molto elevata, mentre per il lungo termine sono accettabili anche frequenze temporali più basse.

Il monitoraggio può essere ulteriormente distinto in **continuo e periodico**: tutti gli strumenti di monitoraggio acquisiscono dati in maniera discontinua con una determinata frequenza temporale che può variare da 1/1000 di secondo a svariati anni, quindi, la differenza tra monitoraggio continuo e monitoraggio periodico dipende dal tipo di monitoraggio, da cosa si monitora e con che frequenza temporale. Non esiste una regola generale o degli standard ma la differenza tra i due dipende dalla relazione che intercorre tra il modello di evoluzione dei processi e la frequenza temporale di acquisizione del dato. Delle volte il monitoraggio continuo può essere nell'ordine di secondi, altre volte di mesi. L'approccio di acquisire dati con la massima frequenza temporale disponibile in molti casi non risulta corretto né tantomeno conveniente. Conoscere la scala alla quale si effettuerà il monitoraggio, pianificare la durata del monitoraggio e valutare la frequenza di acquisizione necessaria sono tutti elementi essenziali per definire le specifiche delle strumentazioni e progettare al meglio la campagna di monitoraggio.

Nella fase di progettazione di una campagna di monitoraggio è estremamente importante valutare anche il budget disponibile per la progettazione stessa, per gli strumenti, per la loro installazione e manutenzione e per l'analisi dei dati. I costi di progettazione, acquisto strumenti ed installazione sono costi "una tantum" mentre quelli per la manutenzione della strumentazione e il trattamento dei dati hanno una certa sistematicità nel tempo. L'instaurarsi di un flusso economico in uscita, solitamente fisso, rende quindi importante prevedere il termine di durata della campagna di monitoraggio. Generalmente, sulla base dell'esperienza, per budget più elevati si ottengono migliori soluzioni di monitoraggio per via della possibilità di accedere a strumentazione di maggiore qualità e di prolungare maggiormente le attività di monitoraggio. Solitamente la percentuale di budget per una nuova costruzione che viene dedicata alle attività di monitoraggio varia tra l'1% e il 3%. Si consiglia, sulla base dell'esperienza accumulata in numerose attività di monitoraggio, la seguente ripartizione di questa percentuale:

- 5-15% per la progettazione del monitoraggio;
- 25-40% per gli strumenti di acquisizione;
- 15-35% per l'installazione degli strumenti;
- 25-50% per la gestione dei dati, degli strumenti e per la manutenzione.

La gestione dei dati comprende l'acquisizione, l'elaborazione, l'interpretazione e la trasformazione in informazioni utili. Spesso capita che si trascuri o si neghi il bisogno di effettuare delle operazioni di manutenzione sugli strumenti di monitoraggio mentre questa rappresenta un'attività essenziale, specialmente per monitoraggi a lungo termine.



## 4. Conclusioni

Con la recente crescita del mercato inerente ai sistemi e alle attività di monitoraggio si ha un conseguente aumento anche dell'esecuzione di attività di monitoraggio applicate a opere geotecniche. In questo contesto si rendono necessarie delle strutture organizzative al fine di progettare al meglio il monitoraggio stesso. Con gli *steps* proposti nel presente articolo e ripresi dagli studi di Dunicliff, rivisitati da Mazzanti (2017) viene proposta una pianificazione sistematica per far fronte alla necessità di programmare efficientemente le operazioni di monitoraggio. Inoltre, sono stati considerati altri elementi utili per una corretta pianificazione delle indagini di monitoraggio come la scala, il periodo, la continuità e la ripartizione monetaria per le varie fasi del monitoraggio. L'aspetto economico in particolar modo è fondamentale per garantire una corretta esecuzione delle attività di monitoraggio geotecnico con una strumentazione adeguata al livello delle risorse economiche disponibili. Questa valutazione sensata delle metodologie da utilizzare e dei piani di progettazione del monitoraggio consente di efficientare i costi del monitoraggio canalizzando le risorse economiche unicamente verso l'obiettivo preposto.



## 5. Bibliografia

- [1] - Dunicliff J (1988) Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons
- [2] - Mazzanti, P. (2017). Toward transportation asset management: what is the role of geotechnical monitoring?. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(5), 645-656.
- [3] - Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique*, 19(2), 171-187.
- [4] - Terzaghi, C. (1938). Settlement of structures in Europe and methods of observation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 103(1), 1432-1448.
- [5] - Perry JG, Pedley M, Brady K (2003b) *Infrastructure embankments – condition appraisal and remedial treatment*. London: Construction Industry Research and Information Association, publication C592.
- [6] - US Department of Transportation (2013) Geotechnical Asset Management: Implementation Concepts and Strategies. Publication No. FHWA-CFL/TD-13-003 January 2013.
- [7] – Oxford Languages. <https://languages.oup.com/>