

CONTROLLI NDT SULLE OPERE GEOTECNICHE PER LA VERIFICA DELLE FASI COSTRUTTIVE E DELLO STATO DI ESERCIZIO

G. Porco* – D. Romano** – G.F. Valer Montero*

* Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile
a.porco@sismmlab.it giuliafvalerm@gmail.com

** Sismmlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria.
d.romano@sismmlab.it

Introduzione

Le progettazione delle opere geotecniche ha da sempre rappresentato, in ambito ingegneristico, una delle attività più affascinanti e complesse da affrontare. Forse le incertezze legate alla caratterizzazione meccanica dei suoli, unita alla esigenza di modellare matematicamente il comportamento del complesso struttura-terreno ossia l'unione di materiali fortemente eterogenei, di fatto, hanno collocato la disciplina in un contesto di elevata complessità progettuale. Notevole inoltre è, su queste opere, la difficoltà di poter effettuare verifiche di affidabilità nel corso della vita utile, ossia controlli che rivelino il reale stato di conservazione delle strutture resistenti e che nel contempo confermino la presenza dei coefficienti di sicurezza imposti in fase progettuale.

Per quanto attiene alle attività progettuali, il più delle volte, ci si imbatte in processi fortemente non lineari sia in termini geometrici che materiali, generati dall'insieme struttura resistente-terreno. Le opere di sostegno, realizzate frequentemente in calcestruzzo armato, interagiscono con terreni e suoli che, intrinsecamente sono eterogenei e con legami costitutivi non completamente definiti, ma dipendenti da diverse variabili, generando quindi, stati di equilibrio non valutabili per via diretta e dipendenti dalla stessa soluzione.

La riprova di quanto asserito è implicitamente contenuta nel nuovo dispositivo normativo, le NTC08; il nuovo testo unico infatti, solo per le costruzioni geotecniche, esprime la possibilità di avere, in fase realizzativa, nonostante siano state eseguite approfondite analisi preliminari, ragioni di incertezza di carattere tecnico, da fugare in fase costruttiva. In pratica, il nuovo dispositivo normativo, consente ai tecnici di utilizzare una procedura progettuale di tipo osservazionale, ma con l'obbligo di dotare, il complesso terreno-struttura di un sistema di monitoraggio da utilizzare in corso di realizzazione e nel corso dell'esercizio.

In relazione invece ai controlli di affidabilità, la situazione non è decisamente più agevole. Spesso gli operatori del settore sono chiamati a disquisire sulle reali condizioni di sicurezza di opere in esercizio sulle quali, oltre alla presenza di materiali usuali quali i calcestruzzi, gli acciai, che comunque con tecniche NDT o di tipo distruttivo possono essere oggetto di indagini sperimentali, presentano elementi non visibili quali, tiranti, contrafforti o taglioni che con la loro azione

assicurano uno stato di equilibrio associato a coefficienti di sicurezza a norma di legge. In queste circostanze, poter verificare l'affidabilità di elementi infissi o nascosti nei suoli, diventa una azione improponibile, se non investendo cospicue somme di denaro che, il più delle volte sono proibitive.

Al fine di avviare un processo di tipo progettuale e realizzativo che consenta, almeno sulle opere geotecniche di nuova realizzazione, la possibilità di una verifica in corso di esecuzione e in esercizio, le NTC08 impongono al tecnico, tra le fasi di articolazione del progetto, di includere la redazione di piani di controllo e di monitoraggio. In pratica il dispositivo normativo chiede, di dotare l'opera di un sistema di misura e controllo attraverso il quale sia periodicamente possibile verificarne l'affidabilità durante le fasi costruttive, in corso di esercizio ed in modo particolare quando l'opera subisce modifiche sostanziali al contorno o quando si presentano particolari condizioni di carico quali quelle sismiche. In particolare la norma precisa che [1]:

Il monitoraggio del complesso opera – terreno e degli interventi consiste nella installazione di un'appropriata strumentazione e nella misura di grandezze fisiche rappresentative quali spostamenti, tensioni, forze e pressioni interstiziali prima, durante e/o dopo la costruzione del manufatto. Il monitoraggio ha lo scopo di verificare la corrispondenza tra le ipotesi progettuali e i comportamenti osservati e di controllare la funzionalità dei manufatti nel tempo.

La norma precisa inoltre che, ove previsto, il sistema di monitoraggio deve essere progettato e definito in tutte le sue parti, ed accompagnato da un programma di monitoraggio, che solitamente, oltre a prevedere il controllo delle grandezze suddette durante le varie fasi di costruzione dell'opera, e di eventuale collaudo, prevede misurazioni da effettuare con periodicità, e di durata tale da consentire di definire le variazioni periodiche e stagionali delle stesse.

Quanto contenuto nel nuovo dispositivo normativo, cambia radicalmente l'impostazione procedurale del controllo in fase di costruzione e di esercizio attuata fino ad oggi, anzi, in riferimento a quest'ultimo aspetto, ossia di eseguire controlli periodici in corso di esercizio si passa, da un palese vuoto normativo, ad una attività con le prerogative di novità assoluta. Infatti in passato, sistematicamente le opere geotecniche realizzate correntemente, non venivano in alcun modo soggette a controlli, tranne nei casi di evidenti stati di degrado o di manifeste condizioni di incipiente collasso. Una delle possibilità offerte ai tecnici, in questi ultimi tempi, per soddisfare la richiesta di disporre di un sistema di controllo, è rappresentata dai sistemi di monitoraggio, basati su rilevatori di deformazione con tecnologia a fibra ottica [2][3]. Queste tecniche di controllo NDT, molto diffuse in altri campi applicativi, da qualche anno sono state applicate in campo civile, rappresentando un utile strumento per il controllo ed il monitoraggio di edifici strategici, di edifici per civile abitazione e non ultimo per il controllo di grandi opere infrastrutturali quali i ponti [4][5][6].

Naturalmente la tecnica sperimentale è affidabile e risolutiva quando è opportunamente affiancata da protocolli procedurali attuativi, che disciplinano le attività sperimentali nelle fasi di costruzione, di collaudo e di esercizio delle opere. Le tecniche di controllo a fibra ottica, anche in campo geotecnico possono costituire un utile strumento per dare affidabili risposte, non solo a quanto richiesto dalla vigente normativa, ma, possono rappresentare un potente veicolo per ridurre in molte circostanze, incertezze di calcolo e interpretative, in modo da favorire la realizzazione di strutture sempre più sicure. Inoltre, uno strumento così potente di controllo, da utilizzare nelle fasi costruttive, potrà favorire una reale convergenza tra la vulnerabilità sismica teorica della struttura e quella reale ottenuta a seguito della realizzazione, con una conseguente conferma del rischio sismico di progetto assegnato all'opera.

Con la prerogativa di fornire un contributo in tale ambito, nella presente nota è proposta una metodologia NDT di carattere sperimentale finalizzata al controllo, sia in fase costruttiva che in esercizio di opere geotecniche. In particolare il lavoro è stato suddiviso in due parti, la prima, di carattere eminentemente teorico, è dedicata alla definizione delle attività di controllo eseguibili con un sistema di rilevazione in tempo reale su opere geotecniche comuni, mentre la seconda parte, di carattere esclusivamente sperimentale, illustrerà due casi reali di monitoraggio, il primo eseguito su alcuni tiranti di ancoraggio impiegati per la stabilizzazione di un versante in roccia, il secondo, su un muro di sostegno.

1. ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO E CONTROLLO IN CAMPO GEOTECNICO

Prima di procedere a illustrare quali attività di carattere sperimentale è possibile espletare su alcuni complessi, struttura-terreno, propri del campo geotecnico, è opportuno soffermarsi a richiamare brevemente, quali elementi costituiscono un sistema di monitoraggio e quali parametri caratterizzanti il comportamento dell'opera è possibile acquisire in remoto, ed in tempo reale.

Partiamo da quest'ultimo aspetto: in pratica con i sensori a fibra ottica è possibile rilevare campi di spostamento su una predeterminata base e valutare, attraverso tali misure, il livello di deformazione raggiunto al crescere dei carichi. L'idea è quella di solidarizzare, sulle barre d'acciaio presenti su una o più sezioni resistenti e inglobate nel calcestruzzo, questi rilevatori e monitorare istante per istante il livello di deformazione raggiunta. Lo stato deformativo acquisito consentirà, successivamente, attraverso il legame costitutivo, di valutare il reale sforzo presente nella barra.

Per quanto attiene invece ai componenti di un sistema di monitoraggio in campo statico, essi sono prevalentemente costituiti da due gruppi, elementi attivi ed elementi passivi. Gli elementi attivi sono i misuratori di deformazione, di temperatura e le centraline di acquisizione che rilevano i dati in predefiniti istanti di tempo, mentre gli elementi passivi sono i cavi di collegamento e i box di raccolta dei terminali dei sensori. Naturalmente l'architettura del sistema di monitoraggio, è frutto

di una attività progettuale che, facendo riferimento alle condizioni di carico che interesseranno l'opera ed utilizzando dei criteri di fascia, identifica posizione e numero dei rilevatori da installare.

L'attività sperimentale da eseguire è invece costituita da una serie di fasi, contenute in un protocollo procedurale di controllo, specializzato quest'ultimo, per la fase costruttiva e per l'esercizio. Naturalmente l'articolazione del protocollo è definita in base alle peculiarità proprie della struttura ed agli obiettivi che si vuole perseguire. In generale le attività sperimentali, svolte seguendo un preciso iter e con la disponibilità di un sistema di monitoraggio, consentono di usufruire di una serie di vantaggi, quali:

- La possibilità di effettuare delle verifiche sulla corretta esecuzione delle diverse parti resistenti, valutando il reale impegno dei materiali e attestando la perfetta rispondenza dell'opera al progetto.
- Offrire al Direttore dei Lavori ed al Collaudatore, dati oggettivi su cui basare le loro assunzioni di responsabilità, sia in corso di realizzazione che in concomitanza delle prove di carico.
- Disporre di una banca dati che fornisca, degli utili riferimenti dall'entrata in servizio dell'opera, in modo da effettuare, nel corso della vita utile dei controlli con metodologia comparativa.
- Avere la disponibilità in tempo reale, di acquisire parametri deformativi in punti prefissati delle sezioni resistenti, per valutare l'affidabilità di un'opera anche a valle di un evento di alta portata quale quello sismico.

Addentrando più specificatamente nelle attività di controllo sperimentale in campo geotecnico si può affermare che, anche in questo ambito le tecniche di monitoraggio a fibra ottica, possono costituire un utile strumento per dare affidabili risposte, non solo in base a quanto richiesto dalla vigente Normativa, ma anche a contribuire efficacemente a ridurre, in molte circostanze, le incertezze di affidabilità strutturale principalmente in aree ad alto rischio sismico o in aree soggette a dissesto idrogeologico.

Le opere geotecniche, anche quelle ordinarie, rivestono il più delle volte connotati di alta importanza sul territorio. Infatti, spesso, grazie alla loro affidabilità e al loro corretto funzionamento sono assicurati i collegamenti viari e le vie di accesso ai centri abitati. In altre circostanze, quando si circoscrive l'analisi alle opere di sostegno poste a tergo di aree o di spazi pubblici, esse garantiscono l'uso di unità abitative o di aree di ammassamento o di primo intervento. Quindi, la portata dell'affidabilità di queste opere non è fine a se stessa, ma a volte produce in modo indotto, un incremento di vulnerabilità sismica anche su quelle ad esse limitrofe.

Per le opere di stabilizzazione dei versanti, per le opere di sostegno e per i pali di fondazione, in genere è possibile garantire le prestazioni di progetto e il mantenimento dei coefficienti di sicurezza dell'entrata in servizio, utilizzando protocolli procedurali di verifica basati

su sistemi di monitoraggio residenti a fibra ottica. Prima di entrare nel merito ad illustrare alcune campagne sperimentali condotte in situazioni reali, per le tre tipologie di opere geotecniche più diffuse e cioè gli interventi di chiodatura per la stabilizzazione dei versanti, i muri di sostegno ed i pali di fondazione, verranno illustrati gli aspetti più importanti delle specifiche attività di monitoraggio partendo dai componenti delle architetture, dalla loro installazione, e dalle possibili attività sperimentali implementabili per ogni tipologia costruttiva, sia in fase di controllo esecutivo, che nel corso della vita utile dell'opera.

1.1 Monitoraggio a fibra ottica per la verifica di affidabilità di opere geotecniche dedicate alla stabilizzazione dei versanti.

Una delle tipologie costruttive molto diffuse in ambito geotecnico, per la stabilizzazione dei versanti in roccia fratturata, è la chiodatura. In pratica si tratta di solidarizzare gli strati più superficiali di roccia disgregata, alle porzioni più profonde di materiale stabile, mediante l'infissione di barre in acciaio, costituite il più delle volte da elementi dywidag e integrati con l'ammasso roccioso mediante iniezioni di malta cementizia. Alcune scelte progettuali prevedono l'utilizzazione di barre in acciaio tesate in opera, in particolare, quando la malta cementizia ha esaurito le fasi di presa e indurimento, con l'ausilio di martinetti idraulici o con altri dispositivi meccanici si imprimono sforzi di trazione sulle testate delle barre. Tali sforzi saranno naturalmente dosati dal progettista, in relazione al tipo di materiale da stabilizzare e si presuppone restino attivi e a valori costanti anche in esercizio. L'azione di trazione è mantenuta in opera per effetto dell'azione di serraggio esercitata da un dado posto in testata alla barra e sistemato in contrasto con una piastra di appoggio, disposta quest'ultima a contatto con la superficie rocciosa.

Sulle piastre, in alcune tipologie di intervento, sono presenti degli occhielli in acciaio che svolgono la funzione di guida per i cavi di sostegno di reti, disposte quest'ultime per il contenimento del materiale instabile e quindi a protezione delle aree limitrofe al versante da stabilizzare. Nella fig.1 è raffigurato un versante in roccia interessato da lavori di stabilizzazione, con tiranti in acciaio di tipo dywidag e rete a doppia torsione.

E' noto agli operatori del settore che, nel corso del processo costruttivo, le figure deputate al controllo delle fasi realizzative, ossia, il Direttore dei Lavori ed il Collaudatore, sono chiamati a svolgere una serie di attività tecnico sperimentali che attestino, oltre alla corretta esecuzione delle chiodature, la presenza degli sforzi di trazione prescritti in fase di progettazione, assicurandone anche la tenuta nel tempo.



Fig. 1 - Costone roccioso stabilizzato con barre Dywidag e rete a doppia torsione.

Inoltre prima dell'entrata in servizio, sarà necessario prevedere delle idonee prove di carico che evidenzino, a carico di trazione crescente, la reale distribuzione degli sforzi lungo la barra e conseguentemente, per sforzi di trazione maggiori, di quelli previsti progettualmente per il montaggio, quale è la effettiva risposta dei tiranti.

Queste problematiche relative alle fasi esecutive e propedeutiche all'entrata in servizio delle opere, si aggiungono a quelle proprie delle fasi progettuali introdotte recentemente dalle NTC08, ossia quelle di dotare le strutture resistenti di un sistema di controllo che consenta, oltre alla verifica mediante l'acquisizione di idonei parametri, delle fasi costruttive, anche il controllo della funzionalità dell'opera nel corso della vita utile.

Una valida risposta, affidabile e mirata, può essere data dotando le opere da realizzare di un sistema di monitoraggio residente, e attraverso la esecuzione di una idonea campagna sperimentale, basata su protocolli procedurali consolidati, potranno essere eseguite tutte le verifiche richieste sia in corso di esecuzione che in stato di esercizio o a valle di eventi sismici.

Per gli interventi di stabilizzazione dei versanti in roccia una metodologia di controllo proposta dagli scriventi qualche anno addietro e già implementata in alcuni interventi, è quella di strumentare un numero rappresentativo di barre, prima di essere collocate nelle perforazioni, con dei sensori di rilevazione delle deformazioni. Un possibile schema di posizionamento dei sensori lungo l'asse della barra è riprodotto in fig. 2. I rilevatori, in questo caso due per ogni barra

strumentata, sono fissati in posizioni utili a valutare, al crescere della profondità, la distribuzione delle azioni che mutuamente roccia e barra si trasferiscono. Con l'ausilio poi, dei cavi di connessione si provvederà a collegare i singoli sensori con un box di acquisizione, posto sul versante in una posizione facilmente raggiungibile dal quale potranno essere effettuate le letture o direttamente o acquisite in remoto.

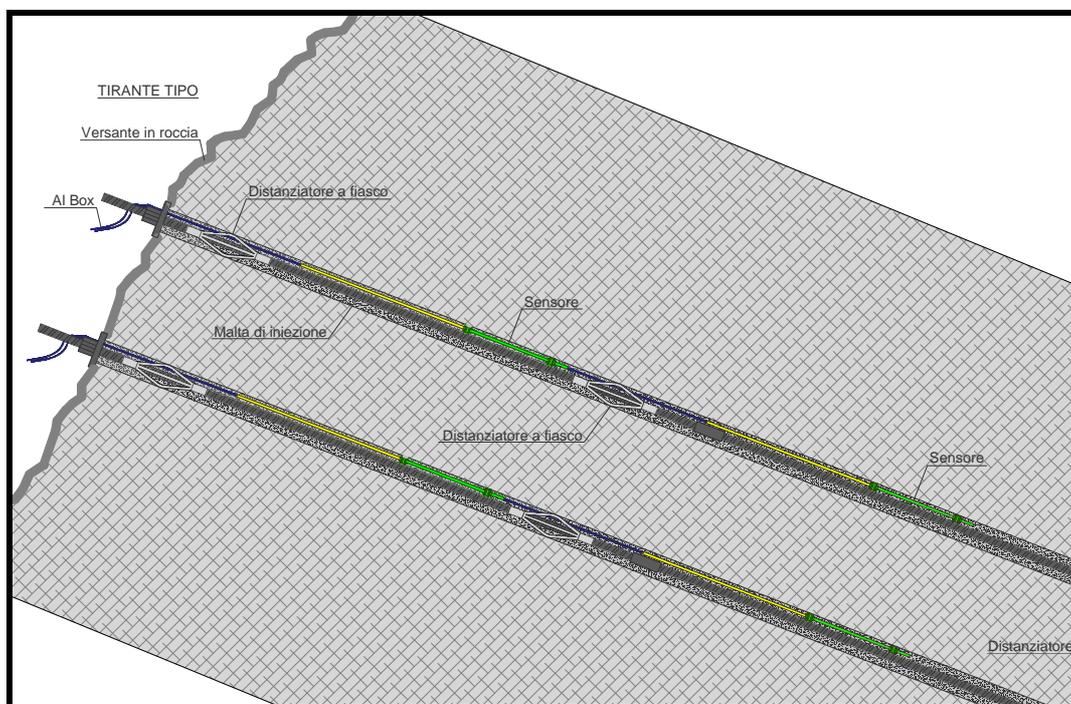


Fig. 2 – Schema di montaggio di sensori a fibra ottica su tiranti in barre dywidag.

Quindi installando i sensori su un numero di barre rappresentative e ben distribuite sul versante, sarà possibile effettuare una serie di valutazioni tecniche sia in fase costruttiva che in corso di esercizio. In generale le misure sperimentali che possono essere acquisite appartengono a tre distinte famiglie, ognuna con obiettivi diversificati e rispondenti a quanto richiesto dal vigente dispositivo normativo, in particolare:

- La prima famiglia, è costituita dall'insieme delle misure rilevate alla data di installazione dei sensori. L'insieme di queste grandezze non ha alcuna prerogativa tecnica per consentire valutazioni sui regimi di sforzo o di sollecitazione, è semplicemente una certificazione di funzionamento di quanto installato. In pratica, si tratta di acquisizioni atte a giustificare la funzionalità della intera architettura del sistema di monitoraggio.
- La seconda, è invece costituita da tutte le misure eseguite sui sensori dal momento in cui la miscela cementizia utilizzata per l'iniezione ha completato le fasi di presa ed indurimento. Le attività sperimentali pertanto, saranno volte a verificare su alcune barre le fasi di tesatura prima dell'entrata in servizio, mentre su altre seguiranno prima le fasi dei processi di carico per attestare la risposta delle chiodature a livelli di sollecitazione maggiore di quella di

esercizio e successivamente, ad attestare il regime di trazione previsto in progetto per l'esercizio.

- La terza famiglia di misure è anche detta a lungo termine e comprende l'ultimo gruppo di dati sperimentali, acquisiti a partire dalla data di entrata in servizio di tutte le barre strumentate e soggette al carico di trazione di esercizio. In questo caso, l'attività di lettura è orientata alla creazione di un *database*, che includa tutte le possibili perturbazioni indotte dalle condizioni ambientali ai regimi di sforzo oramai consolidati e definitivi. In pratica, si tratta di registrare, per un periodo sufficientemente rappresentativo su tutte le basi di misura, le oscillazioni di spostamento opportunamente correlate con le misure di temperatura o con le rilevazioni di altre cause perturbatrici. L'insieme di queste acquisizioni, potrà essere utilizzato nel corso della vita utile per perseguire due obiettivi. Il primo sarà quello di consentire un controllo *routinario* di efficienza del sistema di stabilizzazione, secondo uno schema contenuto nel piano di manutenzione. Il secondo obiettivo perseguibile, sarà quello di garantire risposte immediate, con metodologia comparativa e a valle di eventi di alta portata quali quelli sismici, se l'intervento di stabilizzazione ha subito danni o se è ancora perfettamente efficiente.

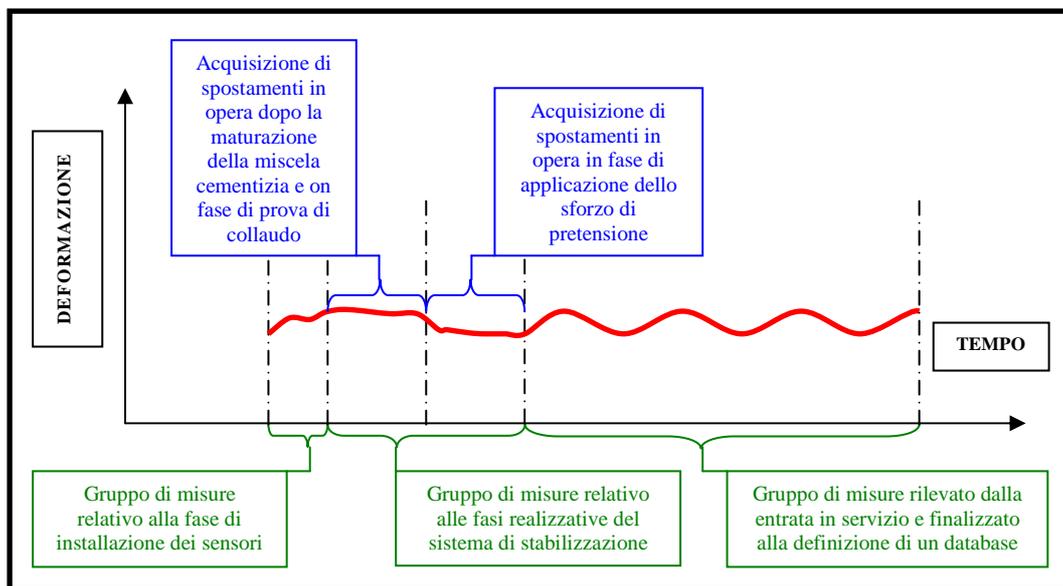


Fig. 3 – Successione cronologica delle attività sperimentali di monitoraggio per il controllo dei tiranti soggetti a prova di carico.

Il sistema di controllo in definitiva consente di seguire sia le fasi realizzative, fornendo utili informazioni per attestare la corretta realizzazione delle cuciture, che l'evoluzione dello stato di efficienza di quanto realizzato nel corso della vita utile. L'insieme dei dati sperimentali acquisiti costituiranno, un *database*, utile ad eseguire verifiche comparative, per garantire il mantenimento

dei coefficienti di sicurezza all'origine o per accertare, a seguito di un sisma di alta intensità, se le strutture resistenti sono state danneggiate o se sono ancora, perfettamente funzionanti.

1.2 Monitoraggio a fibra ottica per la verifica di affidabilità delle opere di sostegno.

Per quanto attiene alle verifiche di affidabilità delle opere di sostegno e più specificatamente ai muri in c.a., sicuramente il comportamento strutturale di queste opere, a parte le verifiche di stabilità globali, è molto più semplice, rispetto alle strutture utilizzate per la stabilizzazione dei versanti. In pratica, la procedura di controllo delle fasi costruttive si estingue con la misura di un regime di deformazione, relativo al ricarico del terreno a monte o alla presenza di eventuali carichi accidentali, da eseguire sul fusto e in fondazione.

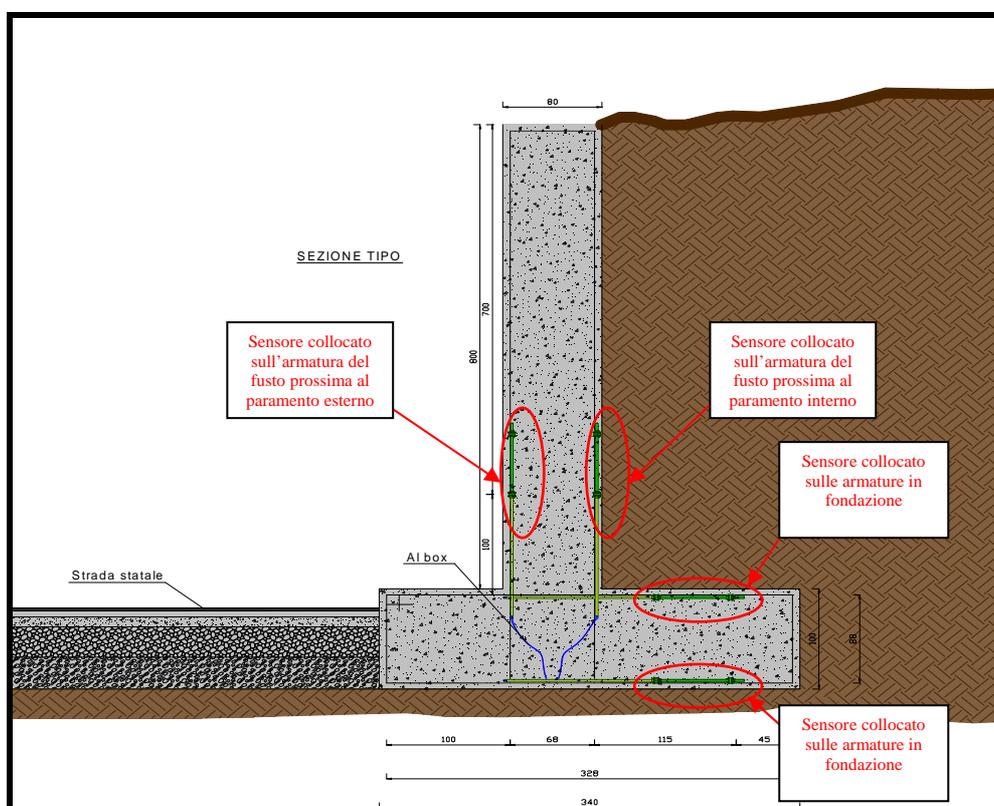


Fig. 4 – Schema tipo per la installazione di sensori di deformazione su un muro di sostegno in c.a.

Anche in questo contesto è stata proposta, sempre dagli scriventi, una procedura sperimentale di controllo basata sull'uso di rilevatori a fibra ottica da applicare in alcune sezioni guida, seguendo un protocollo procedurale per lo sviluppo delle attività di acquisizione secondo una prefissata cronologia. Con riferimento ad uno schema tipico di muro di sostegno in c.a. a mensola, le aree da strumentare risultano sostanzialmente due, una in fondazione ed una sul fusto in prossimità della base. Nella figura n. 4, è riportato un possibile schema di posizionamento dei rilevatori, con i sensori collocati sulle armature del fusto in posizione contrapposta e sulle armature della fondazione sempre in posizione simmetrica. Anche in questo caso, come per tutte le tipologie

costruttive analizzate nella presente nota, la installazione dei rilevatori di deformazione non richiede particolari accorgimenti che modificano le fasi lavorative in cantiere.

Anche per questa tipologia strutturale i dati sperimentali sono raggruppabili in tre famiglie omogenee:

- La prima famiglia, anche in questo contesto, è costituita dall'insieme delle misure rilevate alla data di installazione dei sensori. Si tratta di acquisizioni atte ad attestare l'installazione di architetture di sistemi di monitoraggio perfettamente funzionanti e pronte per essere interrogate.
- La seconda famiglia di dati omogenei, è invece costituita da tutte le acquisizioni eseguite sulle basi di misura, attraverso i sensori, dal momento in cui i calcestruzzi sono stati posti in opera. In tale contesto sarà possibile seguire ad esempio le fasi di maturazione del calcestruzzo valutando anche gli effetti del ritiro che in alcuni casi generano stati deformativi a sollecitazione esterna nulla. Successivamente a maturazione avvenuta, sarà possibile seguire l'incremento del regime deformativo e quindi tensionale che si produce sulle sezioni resistenti a seguito del rinterro delle aree a monte del muro e anche per la presenza di eventuali carichi accidentali. Le attività sperimentali pertanto, saranno svolte e finalizzate in questa fase, esclusivamente al controllo dei livelli di sollecitazione previsti in progetto, per la condizione di carico usuale di esercizio.

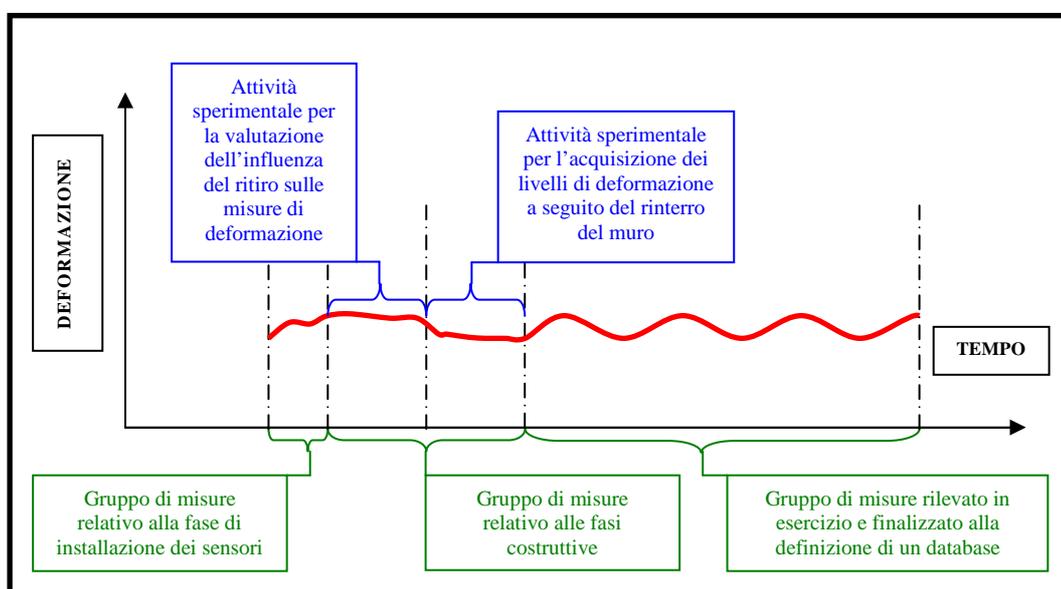


Fig. 5 – Successione cronologica delle attività sperimentali di monitoraggio per il controllo di un muro di sostegno.

- La terza famiglia di misure anche in questo caso, comprende un gruppo di dati sperimentali, acquisiti a partire dalla data di entrata in servizio del muro di sostegno. L'attività di lettura è orientata alla creazione di un data base, che includa tutte le possibili perturbazioni indotte dalle condizioni ambientali ai regimi di sforzo sul fusto e sulla fondazione, regimi di sforzo

appartenenti ad una configurazione di equilibrio stabile per pesi propri, permanenti e carichi accidentali. L'insieme di queste acquisizioni, potrà essere utilizzato nel corso della vita utile del manufatto per consentire un controllo routinario di efficienza e per consentire la verifica con metodologia comparativa a valle di eventi estremi, se l'opera ha subito danni o se è ancora perfettamente efficiente.

1.3 Monitoraggio a fibra ottica per la verifica di affidabilità dei pali di fondazione.

Anche sui pali di fondazione è possibile eseguire verifiche di affidabilità mediante l'installazione di sensori di deformazione. L'attività sperimentale implementabile su queste tipologie strutturali apre naturalmente scenari molto vasti, che muovono dalla interpretazione del comportamento di queste opere inserite in litologie diverse, con geometrie variabili in diametri e lunghezze di infissione, fino alla possibilità di fornire contributi per la fase di schematizzazione teorica progettuale, ancora oggi troppo legata a procedure empiriche.

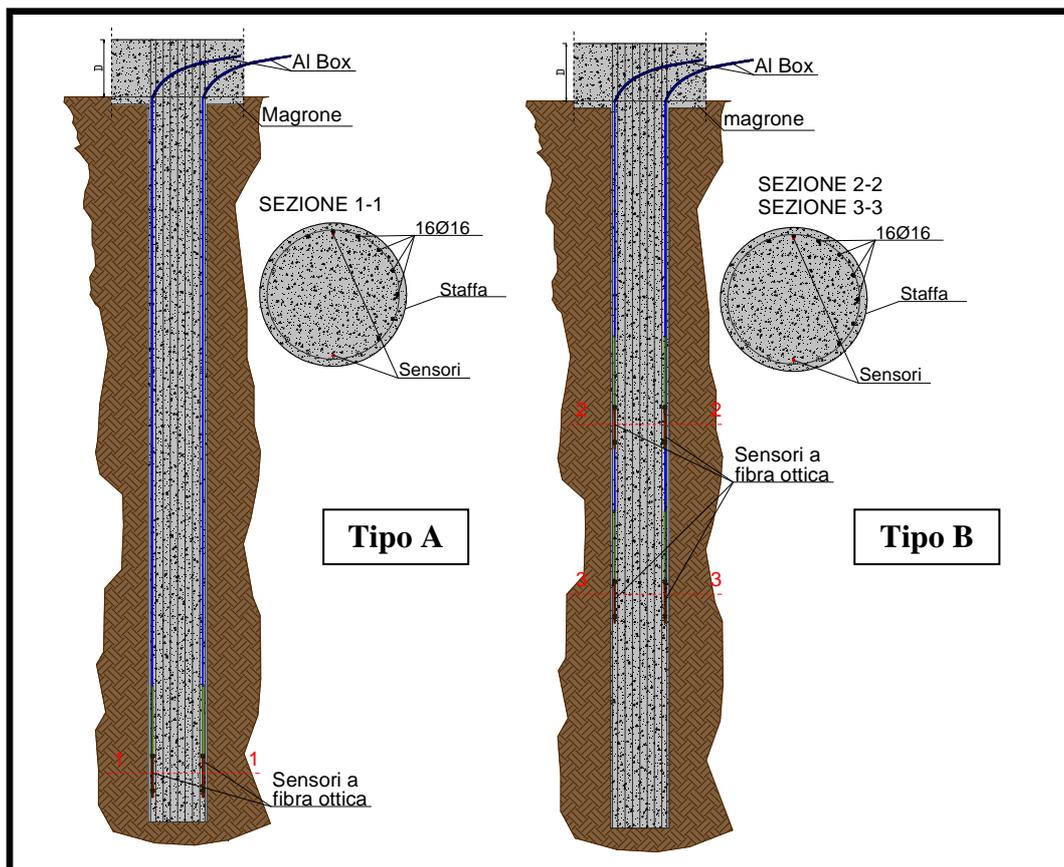


Fig. 6 – Posizionamento tipo dei rilevatori di deformazione per i pali di fondazione. Tipo A: Ubicazione sensori di deformazione per la misura della portanza del palo alla punta. Tipo B: Ubicazione sensori di deformazione per la misura della portanza laterale del palo.

Per brevità espositiva, la discussione sarà comunque circoscritta solo alle verifiche eseguibili in fase costruttiva e nel corso della vita utile del singolo palo, inserito in un complesso strutturale dove, oltre alla presenza di altri pali è presente una rigida piastra di collegamento.

La posizione ed il numero dei sensori da installare sul fusto del palo è naturalmente fortemente influenzata dagli obiettivi che si vogliono perseguire. In alcune situazioni è prioritario rilevare il regime di sollecitazione prodotto dal carico assorbito di punta, altre volte per la lunghezza di infissione e per le caratteristiche meccaniche dei suoli attraversati è rilevante il regime di sollecitazione prodotto dalla portanza laterale, o come spesso accade ci si imbatte in condizioni intermedie dove, entrambe le portanze che generano il carico limite, si attivano contemporaneamente con gradienti di crescita confrontabili. In ultimo potrebbe essere rilevante valutare l'effetto del momento flettente che si genera sul fusto in prossimità della piastra di fondazione rigida e quindi anche questo stato di sollecitazione diventa elemento primario per le stime di affidabilità. Nelle figure 6 e 7 sono raffigurati alcuni schemi di montaggio dei sensori che consentono di valutare, i regimi di sforzo prima richiamati.

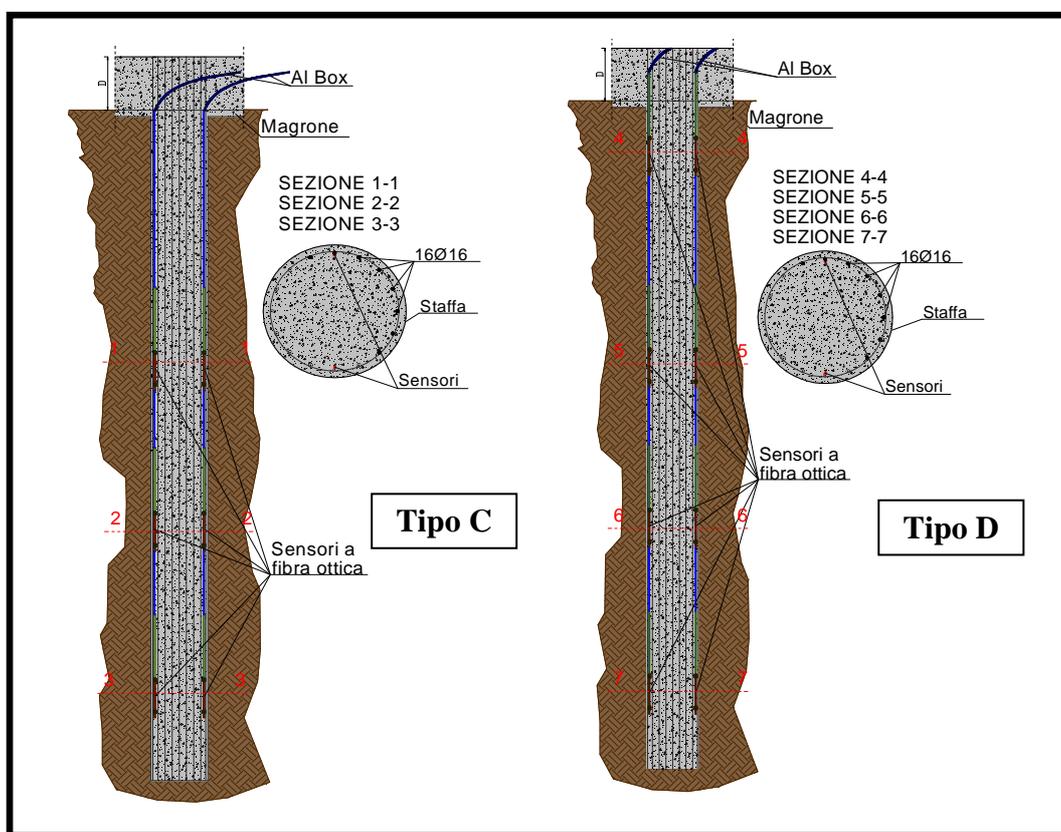


Fig. 7 – Posizionamento tipo dei rilevatori di deformazione per i pali di fondazione. Tipo C: Configurazione di monitoraggio per la misura della portanza di punta e laterale. Tipo D: Ubicazione dei rilevatori di deformazione per la misura della portanza di punta e laterale e degli effetti flettenti in prossimità del corpo di fondazione.

In riferimento invece alle possibili campagne sperimentali attuabili, per brevità espositiva verranno trattate solo le procedure di verifiche in corso di esecuzione, e le verifiche in esercizio basate sulla creazione di un *database* acquisito su un periodo di osservazione rappresentativo.

Teoricamente sui pali di fondazione, i dati sperimentali, limitatamente ai casi di interesse trattati nella presente nota, possono essere raggruppati in tre distinti insiemi omogenei:

- Il primo gruppo è sempre costituito, dall'insieme delle misure rilevate alla data di installazione dei sensori. Quindi attività sperimentale senza alcuna prerogativa di verifica, è semplicemente una certificazione di funzionamento di quanto installato.
- Il secondo gruppo o seconda famiglia è costituita da tutte le misure eseguite sui sensori dal momento in cui il calcestruzzo della membratura oggetto di analisi, è posto in opera. Anche per i pali, come per i muri di sostegno sarà possibile seguire le fasi di maturazione del materiale posto nella perforazione eseguita nel terreno, potendo cogliere, gli effetti del ritiro che avranno caratteristiche evolutive sicuramente diverse, da quelle mostrate dallo stesso materiale con processo di maturazione in atmosfera. Sempre in questo secondo gruppo rientrano le misure eseguite in concomitanza di eventuali prove di carico e quelle che costituiranno gli indicatori del processo di carico sul palo, man mano che la struttura in elevazione viene realizzata. Sicuramente il controllo in questa fase, offrirà la possibilità di confrontare un processo di carico simulato teoricamente, con quanto rilevato effettivamente in opera, inoltre al termine della fase realizzativa si potrà disporre del reale impegno statico del palo, che potrà, rispetto al riscontro teorico offrire eventualmente coefficienti di sicurezza maggiori rispetto a quelli stimati in fase di progetto. Al termine del processo costruttivo, i controlli comparativi effettuati tra le previsioni teoriche e quelle sperimentali, attesteranno la corretta esecuzione dell'opera escludendo eventuali vizi o difetti costruttivi.
- La fase di entrata in servizio dell'opera coincide con le prime rilevazioni appartenenti alla terza famiglia. L'ultimo gruppo di dati sperimentali, è essenzialmente costituito da valori di spostamento acquisiti in presenza di carichi sia di peso proprio, permanenti, che accidentali. In questo caso, l'obiettivo è sempre creare un data base relativo alla valutazione di tutte le perturbazioni indotte dalle condizioni ambientali ai regimi di sforzo oramai consolidati e definitivi. A differenza degli altri casi trattati, la estensione del periodo di osservazione non è di facile previsione. Infatti sulle strutture di fondazione profonde, l'influenza della variazione delle caratteristiche meccaniche dei suoli per la presenza d'acqua, non per forza legata a fattori stagionali, o la modifica di altre variabili perturbatrici, comporta oscillazioni sensibili sui regimi di deformazione. Tuttavia la disponibilità di un rappresentativo insieme di dati su un periodo non minore di diciotto mesi, consente di poter eseguire controlli periodici con metodologia comparativa e controlli in tempo reale quando l'opera è soggetta a condizioni di carico eccezionali per valutarne la reale affidabilità.

2. IL MONITORAGGIO A FIBRA OTTICA PER LE OPERE GEOTECNICHE: ALCUNI CASI DI STUDIO

Per come è stato illustrato seppur succintamente nelle precedenti sezioni, la disponibilità di un sistema residente di monitoraggio, su alcune tipologie strutturali proprie del campo geotecnico offre notevoli vantaggi nelle fasi di controllo in costruzione e in esercizio. Inoltre, rappresenta un valido strumento nel campo della ricerca applicata per consentire di mettere a fuoco problematiche complesse circa la risposta strutturale di opere che, ancora oggi in fase progettuale, sono studiate con procedimenti di calcolo empirici o semi empirici.

Con la disponibilità delle acquisizioni di deformazione eseguite su alcune opere realizzate, sulle quali è stata attivata una campagna sperimentale basata su protocolli predefiniti, ed in particolare, per un intervento di stabilizzazione e per un muro di sostegno, di seguito verranno illustrati i risultati conseguiti mediante l'uso dei sistemi di controllo residenti, mostrando altresì gli innumerevoli vantaggi resi disponibili per gli operatori del settore.

2.1 Tecniche di monitoraggio per il controllo degli interventi di stabilizzazione di un versante in roccia.

La prima campagna sperimentale che verrà illustrata è relativa al monitoraggio di barre in acciaio dywidag utilizzate per un intervento di stabilizzazione di un versante in roccia, limitrofo alla strada di accesso del Comune di Rocca D'Arce (FR). L'intervento di stabilizzazione ha interessato un versante costituito da materiale calcareo fortemente disgregato, con una superficie estesa per oltre 25000 mq. Il progetto ha previsto di stabilizzare le parti superficiali di roccia con barre di tipo dywidag inserite in perforazioni di circa cinque metri di profondità e con diametri di oltre sei centimetri. Oltre alle cuciture solidarizzate nella roccia con malta cementizia, è stato previsto di utilizzare anche una protezione passiva con rete in acciaio a doppia torsione, vincolata alle teste dei tiranti. Sui tiranti, a maturazione avvenuta della malta, il progetto ha previsto l'applicazione di uno sforzo di pretensione, che di fatto costituisce lo sforzo che dovrà essere presente sulla barra in esercizio e per la durata della vita utile. Tale azione di trazione è stata assicurata mediante il contrasto generato tra, il dado di serraggio e la piastra di contatto con la superficie rocciosa.

Dopo aver richiamato gli aspetti salienti dell'intervento di stabilizzazione, possiamo entrare nel merito delle finalità richieste alla architettura di controllo. Il progetto del sistema di monitoraggio è stato redatto con l'idea di perseguire tre precisi obiettivi:

- 1) Controllare per un numero rappresentativo di tiranti la corretta messa in opera, verificando la presenza dello sforzo di tesatura previsto dal progetto;

- 2) Consentire su alcuni tiranti di seguire sperimentalmente le prove di carico, al fine di attestare la corretta risposta degli ancoraggi per valori degli sforzi di trazione molto al disopra di quello previsto per la messa in esercizio;
- 3) Predisporre una banca dati di misure, a partire dalla entrata in servizio dell'opera, per effettuare ad intervalli temporali definiti, in accordo con il piano di manutenzione verifiche di efficienza, funzionalità e di corretta conservazione;

In base al numero dei tiranti installato, ed alla loro densità sul versante, sono state scelte un numero rappresentativo di barre da monitorare. In particolare su ogni barra strumentata sono stati disposti due rilevatori di deformazione in modo da poter cogliere, in una prima sezione sufficientemente distante dal punto di applicazione del carico, lo stato tensionale, ed in una seconda sezione, profonda nell'ammasso roccioso, lo sforzo residuo ancora da distribuire alla roccia. Nella figura seguente è riportato lo schema di montaggio dei due sensori su una generica barra.

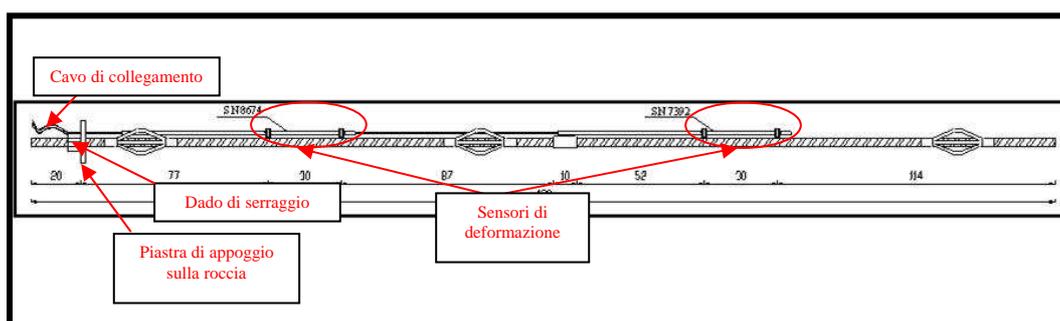


Fig.8 – Schema di posizionamento dei sensori lungo l'asse del tirante di ancoraggio.

I cavi di collegamento dei due sensori così come pure per gli altri tiranti strumentati sono stati portati lungo il costone fino ad un box di alloggiamento dove conferiscono i terminali e dove è possibile eseguire le misurazioni.

Le attività sperimentali, tutt'oggi ancora in essere, hanno consentito di seguire, per la totalità dei tiranti strumentati tutte le fasi costruttive, e per le barre scelte per le prove di collaudo tutte le fasi di carico e di scarico fino al valore di esercizio. Nella presente nota verranno esposte e discusse, per brevità solo le risultanze sperimentali relative alla prova di carico.

Il test di collaudo è stato eseguito su un numero predefinito di barre, secondo un prefissato programma di carico e di scarico, utilizzando per l'espletamento della prova un martinetto idraulico e delle piastre di acciaio di contrasto per come raffigurato in fig.10.

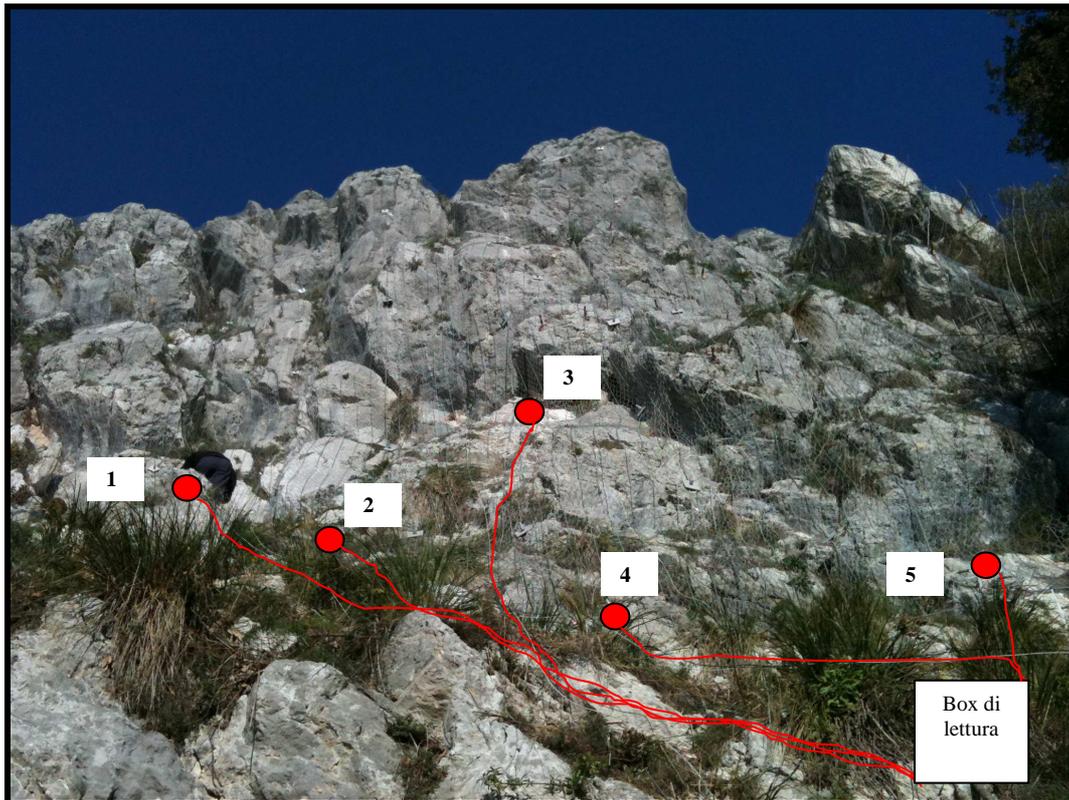


Fig.9 – Vista di alcuni tiranti monitorati e del box di raccolta dei terminali di lettura.

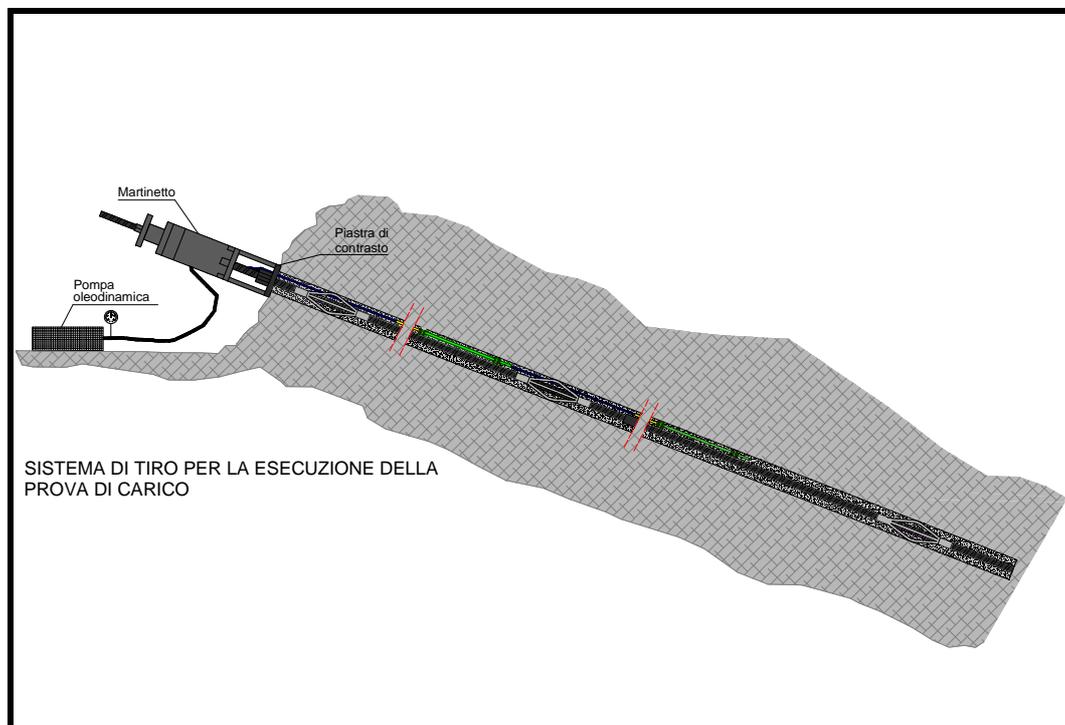


Fig.10 – Schema di carico per la pretensione dei tiranti.



Fig.11 – Fasi esecutive della prova di carico.

I valori di carico sono stati spinti oltre gli usuali valori di messa in opera della barra, sia per verificare la corretta esecuzione dell'ancoraggio, sia per verificare la reale distribuzione di sforzo in profondità. Nella figura 11 sono illustrate, su una delle barre sottoposte a collaudo, alcune fasi della prova di carico .

I valori di riferimento del carico sono stati fissati dal progettista in 10 t per lo sforzo di esercizio ed in 30 t di carico massimo raggiungibile nel corso del test; inoltre allo scarico, ove non fossero stati previsti ulteriori cicli di carico e scarico, lo sforzo residuo era imposto sempre in 10 t. Con le misure di deformazione effettuate ai singoli step di carico, sono stati costruiti dei grafici che illustrano il livello di regime tensionale presente lungo la barra e pertanto come mutuamente, barra e materiale roccioso si trasferiscono gli sforzi. In fig.12 per una delle barre monitorate, indicata come barra n. 2, sono riportati i livelli di tensione presenti lungo l'asse del tirante, ottenuti attraverso le deformazioni misurate ed il legame costitutivo noto dell'acciaio.

I diagrammi dei regimi di sforzo riportati in figura mostrano chiaramente che, il carico applicato, anche al crescere della sua intensità, si dissipa quasi interamente in corrispondenza del primo sensore, quindi la parte attiva del tirante è rappresentata solo dalla parte iniziale, molto piccola rispetto alla lunghezza totale. Le misure restituiscono altresì riprova di una buona esecuzione della chiodatura e fotografano il regime tensionale sotto carico di esercizio. Naturalmente conoscendo la variazione di queste grandezze, a seguito della modifica dei parametri

al contorno, sarà possibile disporre di un buon riferimento da utilizzare in una procedura comparativa di controllo periodico dell'affidabilità dell'intervento di stabilizzazione.

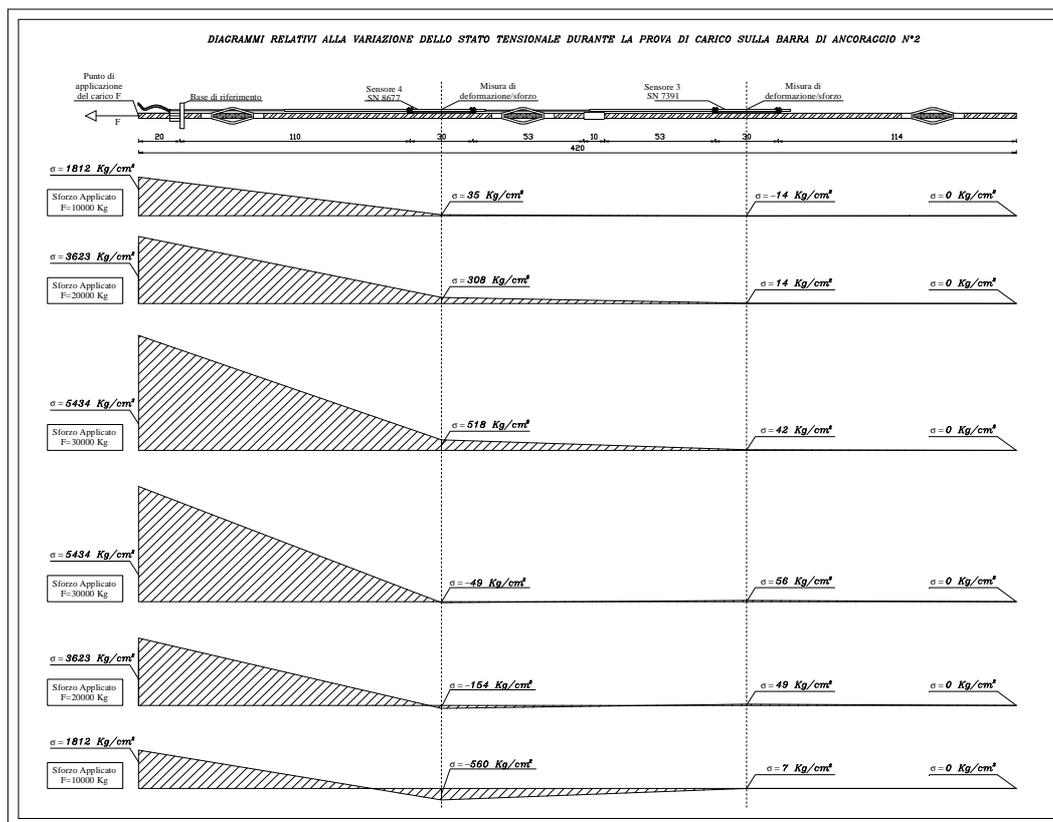


Fig.12 – Diagrammi di sforzo, rilevati per diversi valori di tiro, nella barra di ancoraggio durante la prova di carico.

2.2 Tecniche di monitoraggio per il controllo di un muro di sostegno.

Il secondo caso di studio che verrà discusso in questa sezione è relativo ad una campagna sperimentale di controllo condotta su un muro di sostegno in calcestruzzo armato. L'opera presenta delle caratteristiche geometriche tipiche dei muri di sostegno a mensola, con una fondazione nastriforme sulla quale è incastrato il fusto che si erge per una altezza di circa 4 m. Sia la struttura in elevazione che la suola sono armati con barre di 16 mm di diametro, disposte in successione regolare, sulle quali è stato possibile collocare i rilevatori a fibra ottica. Naturalmente, le fasi di installazione e di monitoraggio sono state precedute dalla redazione del progetto del sistema di controllo e dalla definizione di un protocollo procedurale delle attività sperimentali, per raggiungere gli obiettivi prefissati. Il sistema di monitoraggio, in relazione alla estensione del muro ed in base alla disposizione scelta dal progettista per collocare le armature sul fusto e in fondazione, è stato distribuito su tre distinte sezioni. Per ogni sezione è stato previsto di collocare quattro sensori di cui due sul fusto in posizione contrapposta e molto prossimi all'attacco con la fondazione, in modo da cogliere gli effetti massimi prodotti dalla spinta del terreno. Per quanto attiene alle fondazioni è stato previsto di installare due sensori sempre in posizione contrapposta, sulla sola suola di monte.

Nelle figure 13 e 14 sono evidenziate in pianta, le parti strumentate e sono indicate in sezione sia per il fusto che per la fondazione, le posizioni dove sono stati installati i sensori a fibra ottica.

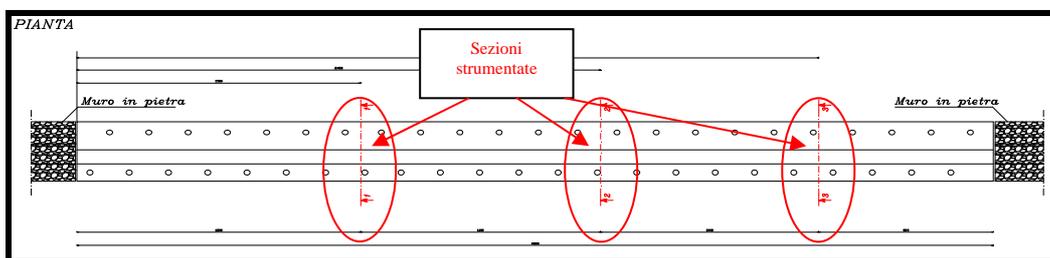


Fig.13 – Sezioni strumentate.

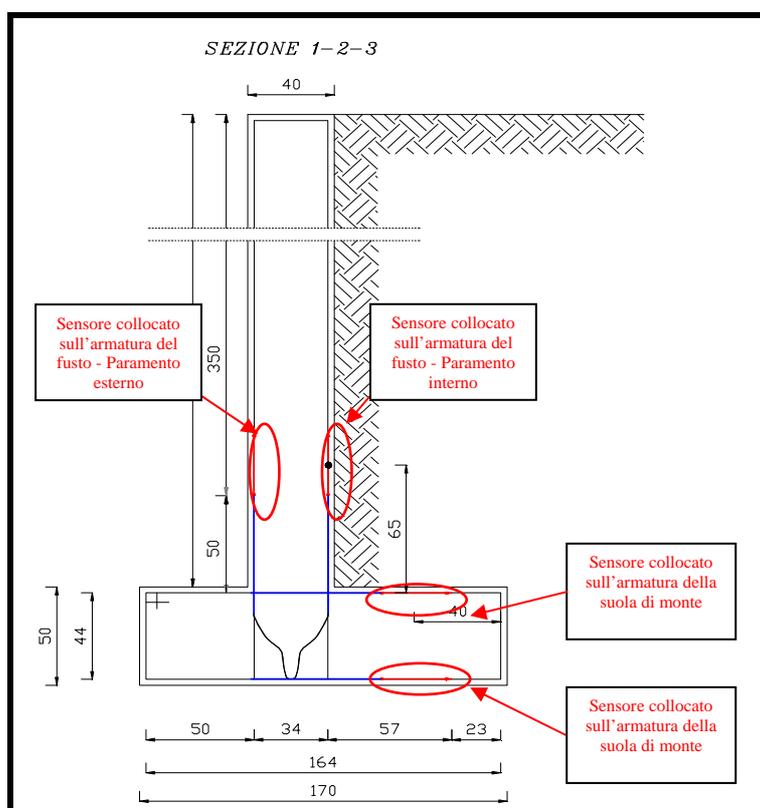


Fig.14 – Schema tipo di montaggio dei sensori sulle sezioni.

Le finalità, da perseguire con il sistema di monitoraggio e che hanno costituito la guida della fase progettuale del sistema di controllo, sono state sostanzialmente due. La prima ha riguardato la possibilità di disporre in più sezioni di un sistema di controllo per le verifiche durante le fasi costruttive. La seconda di acquisire una buona mole di dati in esercizio per poter, in ottemperanza al piano di manutenzione, controllare la funzionalità dell'opera nel corso della vita utile.

Nelle figure 15 e 16 sono illustrate alcune fasi del montaggio dei sensori, in fondazione e sulle armature del fusto del paramento interno ed esterno.



Fig.15 – Fasi di installazione dei sensori in fondazione.



Fig.16 – Fasi di installazione dei sensori sulle armature del fusto di paramento interno ed esterno.

I risultati sperimentali che verranno illustrati, per brevità saranno limitati al solo controllo delle fasi costruttive del fusto. La verifica è sostanzialmente consistita, per tutte e tre le sezioni di riferimento nel confrontare i valori di deformazione teorica attesa, con i valori medi di deformazione misurati sperimentalmente.

I dati sperimentali sono stati acquisiti per tutto il periodo costruttivo, fino al completamento dell'opera coincidente con la sua entrata in servizio, coprendo un intervallo di circa otto mesi. In tale spazio temporale le attività sperimentali hanno seguito sin dalle fasi di getto, prima la maturazione dei calcestruzzi e poi le successive variazioni di deformazione indotte dal rinterro del materiale collocato a monte del fusto, registrando contestualmente anche le variazioni di temperatura in situ.

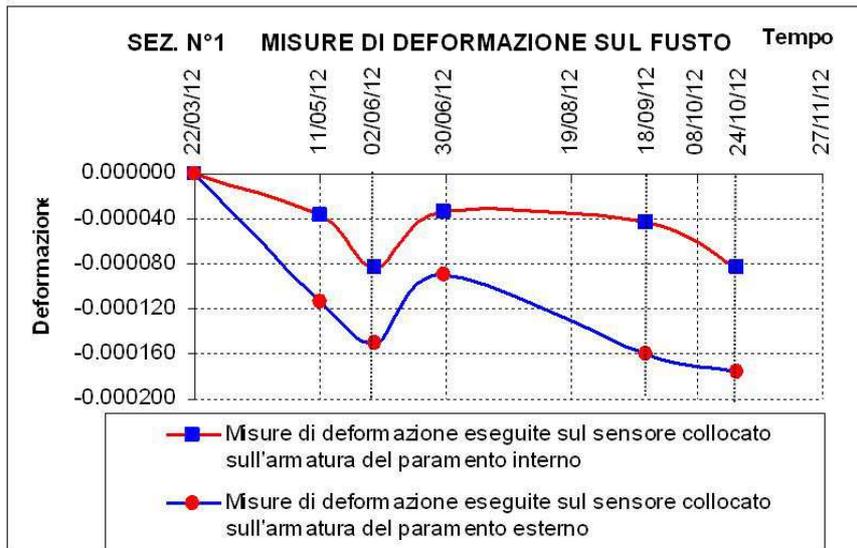


Fig.17 – Misure di deformazione acquisite sul fusto della sezione n°1 sul paramento interno e sul paramento esterno.

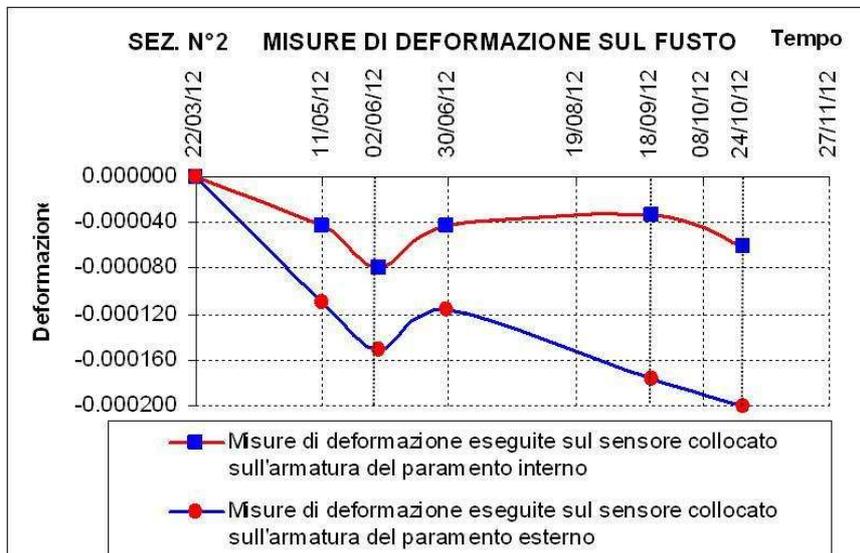


Fig.18 – Misure di deformazione acquisite sul fusto della sezione n°2 sul paramento interno e sul paramento esterno.

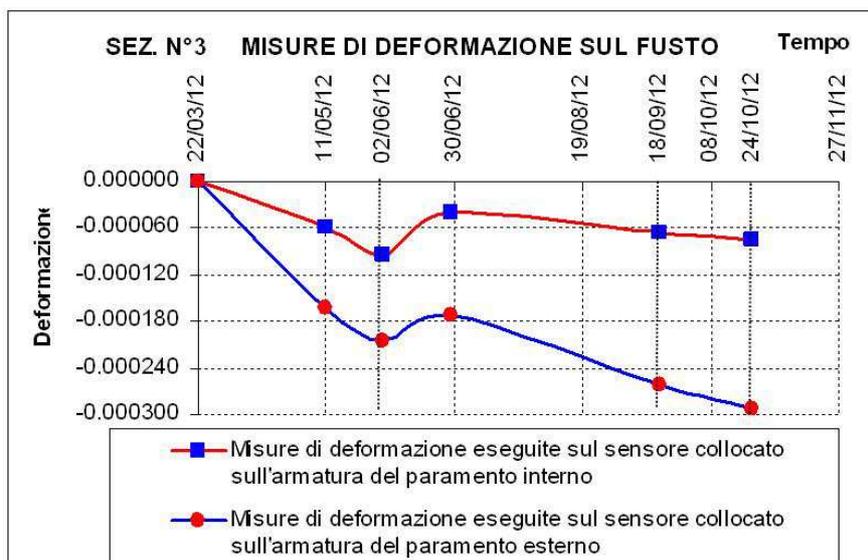


Fig.19 – Misure di deformazione acquisite sul fusto della sezione n°3 sul paramento interno e sul paramento esterno.

Nelle figure 17,18 e 19 sono riportate le curve evolutive di deformazione registrate in situ sulle tre sezioni e per i sensori collocati sulle armature del fusto sia in zona interna, che in zona esterna.

La prima cosa che si nota dai grafici è che, il regime di deformazione per tutto il periodo di osservazione è sempre negativo, sia per i sensori collocati a monte che per quelli collocati a valle, con valori di deformazione più elevati per questi ultimi. Intuitivamente invece, almeno per la sollecitazione dovuta all'aliquota del carico più importante, cioè la spinta del terreno, l'attesa era quella di ritrovare deformazioni di segno opposto. In particolare, sforzi di trazione sul sensore collocato sul paramento interno o di monte, e quindi con deformazioni positive, mentre sforzi di compressione sul sensore collocato sul paramento esterno o di valle, con in questo caso deformazioni negative. Tale condizione, che all'apparenza può essere valutata come una incongruenza, in realtà ha una sua precisa giustificazione nel fatto che l'opera manifesta, attraverso le misure sperimentali, un regime di deformazione reale e complessivo, ossia somma della spinta del terreno, del ritiro del calcestruzzo e delle variazioni termiche cui la struttura è stata sottoposta nel periodo di osservazione. Tale comportamento reale, non sempre coincide con la percezione del comportamento strutturale del progettista, la quale è fortemente ancorata alle condizioni di carico utilizzate nelle fasi di progettazione, ed imposte da schematizzazioni di calcolo contenute nelle norme di riferimento, a volte avulse da altri importanti parametri deformativi e orientate principalmente alla valutazione di stati di sforzo rappresentativi.

A parte questa prima apparente incongruenza, che tra l'altro sarà ripresa e confermata in termini numerici nella parte dedicata alla valutazione teorica dello stato di deformazione, è possibile effettuare, già con questi soli dati, delle valutazioni comparative sul comportamento della struttura che consentono di effettuare alcune prime verifiche e di formulare delle mirate conclusioni. Dai grafici si nota chiaramente che, per tutte e tre le sezioni il comportamento è confrontabile sia in termini numerici che di andamento delle funzioni di deformazione, quindi, nelle tre zone monitorate la risposta strutturale reale è sostanzialmente identica. Questa evidenza di fatto attesta una buona omogeneità dei materiali utilizzati per la realizzazione dell'opera, che rispondono in diversi punti, alle sollecitazioni indotte con gli stessi valori di deformazione. Inoltre appare evidente che su tutta la struttura di sostegno non emergono aree con singolarità dei regimi di deformazione quindi, il regime di sollecitazione prodotto sul fusto dal terreno, è comparabile per tutta la estensione del muro. Confermando indirettamente la corretta esecuzione del rinterro e la omogeneità del materiale utilizzato come riempimento a monte del fusto.

La seconda parte delle verifiche è stata invece orientata ad effettuare il confronto tra questi valori reali di deformazione, trasformati in valori medi, con i valori teorici, al fine di poter accertare

che, il comportamento del muro fosse congruente con il comportamento teorico ipotizzato in fase progettuale e in questo caso attraverso valutazioni numeriche oggettive e non in modo comparativo.

Per quanto attiene alla valutazione delle deformazioni teoriche attese, valutate sul fusto in zona prossima al paramento interno ed in zona prossima al paramento esterno, ossia nelle stesse posizioni dove sono stati installati i sensori, sono stati presi in considerazione gli effetti prodotti da tre fattori. Il primo contributo di deformazione considerato è quello prodotto dal terreno posto a monte, valutando la spinta del terreno in condizioni attive, il secondo portato in conto è quello generato dal ritiro del calcestruzzo e calcolato secondo quanto riportato in [7], mentre, il terzo contributo considerato è quello prodotto nel periodo di osservazione dalle escursioni termiche, valutando le deformazioni corrispondenti, in funzione del coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo e della escursione di temperatura misurata nell'intervallo di osservazione. Tali determinazioni, abbastanza semplici in questo contesto, sono imprescindibili in tutti i casi in cui l'obiettivo del monitoraggio è quello di effettuare confronti numerici, tra valori teorici con valori sperimentali. Infatti, i regimi di deformazione registrati dai sensori a fibra ottica, essendo quest'ultimi installati prima del getto, risentono sia delle fasi di maturazione del calcestruzzo, sia delle contrazioni o dalle estensioni generate dalle variazioni di temperatura restituendo uno stato deformativo complessivo che non è ascrivibile esclusivamente alle condizioni di carico previste dal progetto. Per il caso in esame inoltre, i valori di deformazione teorici prodotti dal ritiro e dalla spinta del terreno, non sono stati considerati come deformazioni istantanee e quindi localizzate in un preciso istante, bensì distribuite nel tempo secondo modelli evolutivi disponibili nella letteratura di riferimento. Una volta valutati singolarmente i contributi per le due aree e cioè, quella sul paramento interno e quella sul paramento esterno, nell'ipotesi di sovrapposibilità degli effetti sono stati calcolati i regimi di deformazione teorica complessivi per gli stessi intervalli temporali utilizzati nella sperimentazione in situ.

Nella figura 20 è riportata la evoluzione del regime di deformazione teorica valutato sulle fibre del fusto collocate all'interno, ossia prossime con il terreno di riempimento, in confronto con i valori di deformazione media rilevata in opera. In riferimento a quest'ultima grandezza è bene ribadire che essa è stata ottenuta come media delle rilevazioni effettuate dai tre sensori collocati geometricamente nella stessa quota e sullo stesso paramento ma in tre distinte sezioni.

Nella figura 21 è invece riportata la evoluzione del regime di deformazione teorico valutato sulle fibre del fusto collocate all'esterno ossia a contatto con l'atmosfera, poste sempre a confronto con i valori di deformazione media. I grafici restituiscono, per entrambe le aree investigate una buona aderenza tra i dati teorici e quelli sperimentali, ciò attesta la buona affidabilità dei rilevatori a fibra

ottica e quindi delle architetture di controllo come strumento NDT per garantire la presenza dei coefficienti di sicurezza previsti in progetto.

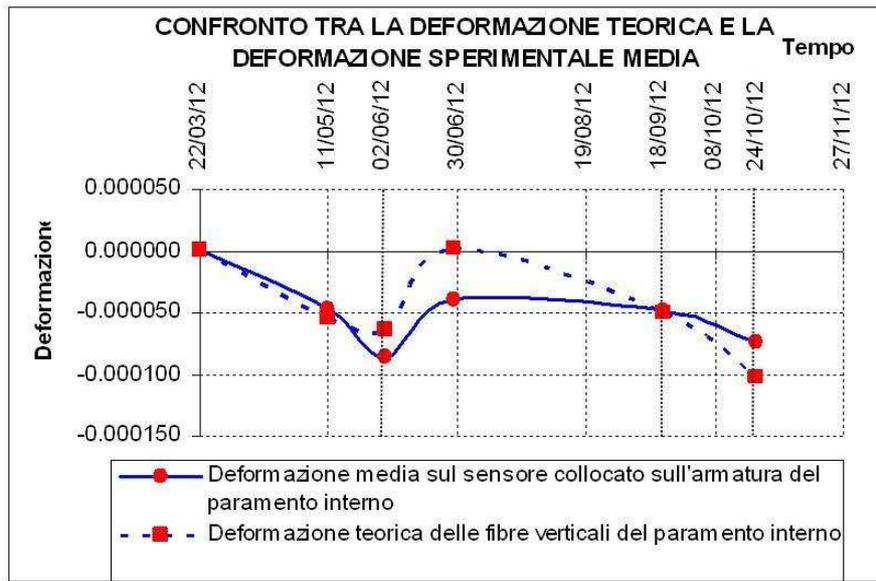


Fig.20 –Evoluzione del regime di deformazione teorico delle fibre verticali del paramento interno del fusto in comparazione con i valori sperimentali medi.

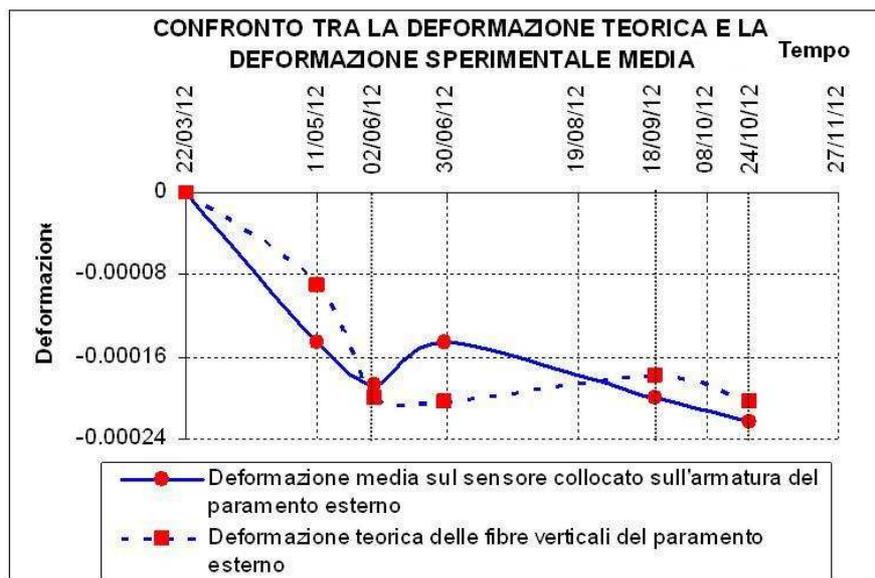


Fig.21 –Evoluzione del regime di deformazione teorico delle fibre verticali del paramento esterno del fusto in comparazione con i valori sperimentali medi.

Per quanto attiene invece alla struttura monitorata la conoscenza del reale stato di deformazione presente sulle barre d'acciaio e quindi sulla intera sezione resistente, restituisce al tecnico il reale impegno dei materiali presenti, testimoniando una congruenza certa tra le risposte strutturali teoriche e quelle reali. Altra considerazione che è possibile effettuare, è che l'opera, rispondendo a quanto previsto in progetto in termini di regimi di deformazione e di sforzo sarà priva di difetti costruttivi. Inoltre nel caso in cui l'opera di sostegno fosse collocata in area sismica, sicuramente la sua vulnerabilità sismica reale, è attestato dalla sperimentazione, coincide con la

vulnerabilità sismica teorica. Quest'ultima conclusione è forse la più importante, in quanto molto spesso la vulnerabilità sismica reale di un'opera, non coincide con la vulnerabilità sismica di progetto, generando indicatori di rischio sismico sensibilmente lontani dalla realtà e purtroppo il più delle volte sensibilmente sottostimati, con evidenti ripercussioni per la salvaguardia dei beni e delle vite umane.

3. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata presentata una tecnica sperimentale NDT finalizzata al controllo strutturale di opere geotecniche di nuova realizzazione. La tecnica di monitoraggio illustrata, attraverso architetture dedicate con rilevatori a fibra ottica e basata su protocolli procedurali attuativi definiti, costituisce al momento una delle metodologie più affidabili per garantire, unitamente al controllo di legge previsto per i materiali, la presenza in opera dei coefficienti di sicurezza previsti in progetto. Attraverso questa metodologia, sarà possibile vigilare sia sulle fasi costruttive affinché i materiali in opera siano dotati dei parametri di resistenza previsti in progetto, sia al trascorrere del tempo e quindi nel corso della vita utile, verificando periodicamente o a valle di eventi estremi, il reale stato di efficienza dell'opera.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – *Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 “Norme tecniche per le costruzioni”* – G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30.
- [2] G. Porco, D. Romano, G.F. Valer Montero – *“Le tecniche NDT per il controllo dei materiali e delle strutture in Ingegneria Civile”*. AIPnD, Il ruolo dei controlli NDT per le verifiche di affidabilità e per le attività di manutenzione- volume primo. Raccolta delle memorie presentate in occasione del convegno AIPnD – MADEexpo 19/10/2012.
- [3] D. Inaudi – *“SOFO Sensors for Static and Dynamic Measurements”*. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004.
- [4] E. Mehrani, A. Ayoub, A. Ayoub - *“Evaluation of fiber optic sensors for remote health monitoring of bridge structures”*. Materials and Structures (2009) 42:183-199.
- [5] A. Del Grosso, A. Torre, D. Inaudi, G. Brunetti, A. Pietrogrande – *“Monitoring System for a Cable-Stayed Bridge using static and dynamic Fiber Optic Sensors”*.
- [6] B. Glisic, D. Inaudi – *“Overview of Fiber Optic Sensing Technologies for Geotechnical Instrumentation and Monitoring”*. Geotechnical News, September 2007.
- [7] M. Collepari – *“Il nuovo calcestruzzo”*. Seconda edizione, casa editrice Tintoretto. Giugno 2002.