

SISTEMI INTEGRATI PER IL MONITORAGGIO, L'EARLY WARNING
E LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO
LUNGO LE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE



UNIONE EUROPEA
Fondo europeo di sviluppo regionale



PON Ricerca e Competitività
2007-2013

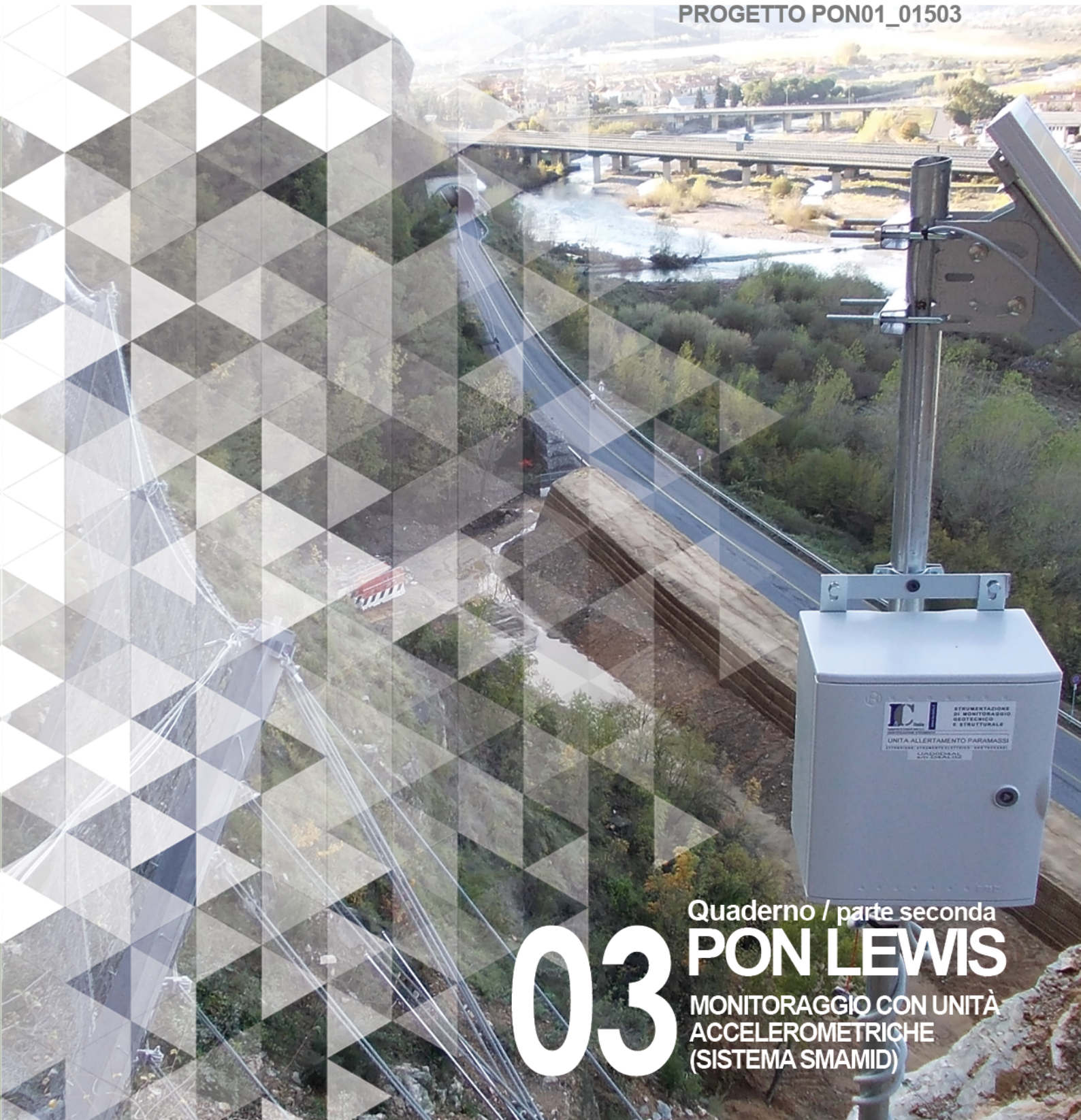


Ministero dell'Infrastruttura
e dei Trasporti



Ministero dello Sviluppo Economico

investiamo nel vostro futuro
PROGETTO PON01_01503



Quaderno / parte seconda
03 PON LEWIS
MONITORAGGIO CON UNITÀ
ACCELEROMETRICHE
(SISTEMA SMAMID)



autostrade//Tech



A cura di Giovanni Mannara | **DELIVERABLE WP 2.2**
Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
/ Parte seconda

INDICE

ATTIVITA' ELEMENTARE 2.2.3

1 **Interazione col DEIS per un'indagine sulle possibili soluzioni architetture elettroniche alternative per SMAMID**

2 **1. Sistema SMAMID corrente**

4 **2. Criticità del dispositivo attuale**

4 **3. Ipotesi futura**

6 **4. Definizione delle esigenze funzionali del sistema SMAMID WP 2.2**

7 4.1 Schema 1. Monitoraggio frane

9 4.2 Schema 2. Sistema monitoraggio e rivelazione quadri fessurativi

11 4.3 Schema 3. Sistema monitoraggio tappetino strumentato

12 **5. Test prototipo sviluppato dal DEIS**

ATTIVITA' ELEMENTARE 2.2.4

14 **Identificazione specifiche funzionali di comunicazione dati e informazioni tra il sistema di monitoraggio frane e il CAED**

Riferimenti bibliografici

APPENDICE

18 **Strumentazione geotecnica per il monitoraggio frane**

18	1. Strumentazione geotecnica di controllo delle pressioni e dei movimenti
18	1.1 Generalità
18	1.2 Impieghi della strumentazione geotecnica
20	1.3 Componenti della strumentazione
20	1.4 Pianificazione dei programmi di monitoraggio
21	1.5 Obiettivi del monitoraggio
22	1 - Gallerie in terreni caotici
22	2 - Gallerie in roccia
23	3 - Frane in materiali fini
25	4 - Dissesti in versanti rocciosi
25	5 - Pendii e rupi su cui sorgono centri abitati
27	2. Piezometri
27	2.1 Pozzo di osservazione
28	2.2 Piezometro aperto a tubo fisso
35	2.3 Piezometro idraulico a due tubi
40	2.4 Piezometri pneumatici, a corda vibrante, ed elettrici
46	2.5 Piezometri multipli
47	2.6 Tempo di risposta dei piezometri
49	3. Celle di pressione
50	3.1 Celle di pressione all'interno di un terreno
53	3.2 Celle di pressione all'interfaccia di un elemento strutturale
55	3.3 Celle di pressione elettriche a corda vibrante
55	3.4 Cella di pressione elettropneumatica
57	4. Assestimetri
57	4.1 Assestimetri a piastra
58	4.2 Assestimetro fisso in foro di sondaggio
59	4.3 Assestimetri con fili metallici a tensione costante

61	4.4 Assestimetro a sonda
64	5. Inclinatori
65	5.1 Tubi inclinometrici
66	5.2 Sonda inclinometrica
68	5.3 Unità di lettura
70	5.4 Elaborazione dei dati
71	6. Estensimetri



Interazione col DEIS per un'indagine sulle possibili soluzioni architetture elettroniche alternative per SMAMID

Nell'ambito della collaborazione col Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS) di UniCal per un'indagine sulle possibili soluzioni architetture elettroniche alternative per SMAMID si sono svolte attività di interfacciamento e di confronto onde indirizzare l'orientamento della ricerca da parte del DEIS. Sono stati innanzitutto trasmessi dati e documenti inerenti le caratteristiche tecniche del sistema SMAMID al Prof Corsonello. Nell'ottica di pervenire a una progettazione di un sistema elettronico per SMAMID alternativo all'attuale che consenta di superarne taluni limiti prestazionali, con particolare, ma non esclusivo, riferimento all'applicazione del monitoraggio frane, si è proceduto attraverso le seguenti fasi:

1. Definizione delle esigenze funzionali del sistema SMAMID. Si è partiti dalla considerazione che nella versione attuale di SMAMID la singola unità limita le sue attività di elaborazione dati al calcolo della media del profilo accelerometrico acquisito per un certo intervallo di tempo con una certa frequenza di acquisizione, mentre a carico del PC collegato alla unità master, che coordina le attività delle singole unità di rete inviando comandi dal PC alle unità e ricevendo dati dalle unità da indirizzare al PC, resta la parte di elaborazione del dato che conduce al calcolo dell'inclinazione, della variazione di inclinazione, oltre che la gestione dei dati di inclinazione per la determinazione delle condizioni di allarme, compreso l'invio di allarmi. Così, volendo concentrare nel sistema SWAN l'elaborazione del dato inclinometrico e la gestione dei risultati dell'elaborazione, si è individuata un'esigenza funzionale base sinteticamente di seguito espressa da soddisfare nella architettura elettronica da implementare:
 - o Maggiore capacità di elaborazione e gestione dati della scheda master che consenta di pervenire:
 - i. al calcolo e al pattern delle inclinazioni e delle variazioni di inclinazione a bordo di ogni singola scheda;
 - ii. all'implementazione del confronto del pattern determinato al punto sopra con le condizioni di soglia per altra via determinate;
 - iii. alla generazione e gestione di allarmi.

2. Identificazione di flussi di elaborazioni dati tipiche nel monitoraggio frane con SMAMID. Alla luce del fatto che un punto nodale per il miglioramento delle performance applicative del sistema SWAN è costituito dal potenziamento delle capacità computazionali dell'unità master, si è redatto e fornito al DEIS un tipico flusso dati da gestire su scheda master, al fine da identificare quale sia lo sforzo computazionale richiesto e elaborare conseguentemente soluzioni idonee. Tale flusso dati può essere, in estrema sintesi, così presentato:
 - a. Calcolo dell'inclinazione e della variazione di inclinazione, a partire dalla determinazione dei coseni direttori del vettore accelerazione totale, che può assumersi pari alla gravità nell'ipotesi di acquisizione in condizioni statiche;
 - b. Ricostruzione del pattern spaziale di inclinazione con visualizzazione grafica nella forma di quadro sinottico di dettaglio;
 - c. Confronti con condizioni di soglia con visualizzazione di quadro sinottico generale di stato del sistema;
 - d. Gestione allarmi;
 - e. Valutazione di massima dei costi di soluzioni architetture alternative.

Parallelamente alle fasi precedenti si è avuta una indicazione di massima circa i costi connessi ad alcune configurazioni architetture, quali FPGA e ASIC, per tenere nel debito conto un fattore rilevante quale il costo nella determinazione della applicabilità di un sistema con una struttura elettronica in termini di sostenibilità economica.

1. SISTEMA SMAMID CORRENTE

Ciascuna Unità Funzionale (UF) di SMAMID è costituita da:

- un accelerometro MEMS triassiale;
- un microcontrollore a 8 bit, che governa le attività dell'UF ed elabora i dati;
- 4 MiB di memoria per la memorizzazione dei dati stessi;
- un sensore di temperatura;
- un orologio/calendario (dotato di batteria tampone "a bottone"), che consente di etichettare con informazioni temporali le acquisizioni effettuate;

- un'interfaccia di comunicazione seriale RS485;
- un'interfaccia di comunicazione wireless.

La figura seguente mostra uno schema generale della versione corrente.

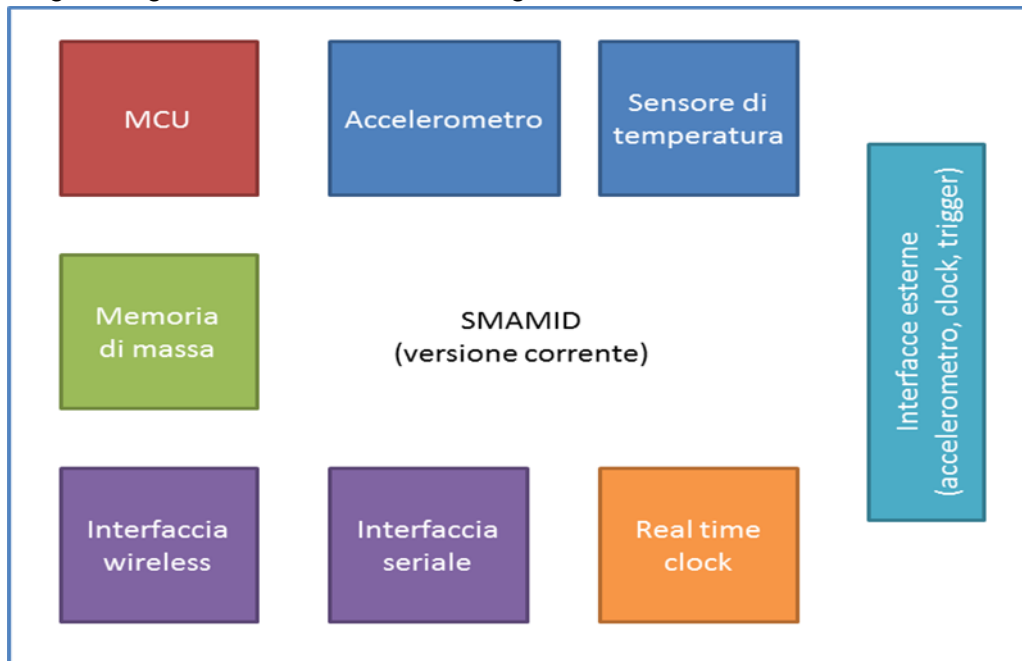


Figura 80. Schema generale della versione corrente di SMAMID

Il sistema può funzionare in modalità stand-alone oppure in rete (mediante interfaccia RS485 o wireless); sono previste due principali modalità di funzionamento (salvataggio dati e invio diretto dei dati) e diversi metodi di avvio dell'acquisizione dei dati, che comprendono un trigger a soglia con varie opzioni, avvio a comando, mediante pulsante onboard, segnale esterno, orario prefissato.

In modalità Salvataggio dati è possibile memorizzare una certa quantità di dati (circa 1.900.000 campioni accelerometrici) a bordo della scheda elettronica, mediante l'utilizzo di una memoria RAM, che funge da buffer per il successivo download dei dati su un personal computer.

Nelle fasi di inattività il sistema può essere messo in stand-by, e il recupero da tale stato può avvenire opzionalmente mediante comando via seriale o wireless, mediante pulsante onboard o mediante allarme orario. Il consumo in stand-by è ridottissimo: quando è richiesta solo l'uscita da stand-by mediante allarme orario l'assorbimento dell'intera elettronica è pari a circa 80 μ W.

Il sistema è generalmente alimentato a batteria, con un'autonomia che può superare i tre anni, in base alle condizioni di funzionamento.

A bordo sono presenti alcune interfacce per segnali esterni: è possibile in particolare collegare un segnale esterno di trigger, un clock esterno per sincronizzare più UF, ed infine è possibile collegare un accessorio opzionale (SMAMID Remote) che consente di spostare l'elemento sensibile (accelerometro) all'esterno della scheda elettronica principale, nei casi in cui questo sia necessario.

2. CRITICITÀ DEL DISPOSITIVO ATTUALE

Nonostante le grandi potenzialità del dispositivo corrente, esistono alcune criticità che si ipotizza possano essere superate, del tutto o in parte, mediante la nuova implementazione che qui si propone:

- disponibilità di un unico modello di sensore, con caratteristiche specificamente rivolte ad alcuni tipi di applicazioni e non adatte ad altre
- mancanza della possibilità di elaborare i dati a bordo in maniera sistematica e con strumenti avanzati (l'unica elaborazione effettivamente implementata allo stato attuale è la media aritmetica dei campioni acquisiti)
- mancata disponibilità di memoria di massa non volatile per l'immagazzinamento a bordo dei dati (data logging).

L'obiettivo dell'ipotesi di revisione del progetto è dunque risolvere queste criticità e possibilmente sfruttare la versatilità dell'FPGA per ridurre il numero di componenti e dunque la complessità del circuito (con possibili ripercussioni positive sui costi di produzione).

3. IPOTESI FUTURA

L'ipotesi di lavoro principale consiste essenzialmente nel separare l'Unità Funzionale in due blocchi:

- il primo blocco è costituito dai sottosistemi che sono sempre utilizzati in tutte le applicazioni possibili:

- unità di elaborazione
- memoria tampone (buffer)
- real time clock
- sensore di temperatura
- il secondo blocco comprende un certo numero di estensioni esterne per l'unità centrale:
 - interfaccia seriale
 - interfaccia wireless
 - eventuali altre interfacce
 - memoria di massa
 - sensori (non necessariamente accelerometri, ed in numero variabile in base all'esigenza).

L'ipotesi di separare il sistema in due parti deriva dall'esperienza maturata dall'utilizzo di SMAMID nelle varie applicazioni in campo, nonché da considerazioni generali sulle possibili opportunità future. Uno schema di massima di questa ipotesi è mostrato nella figura seguente.

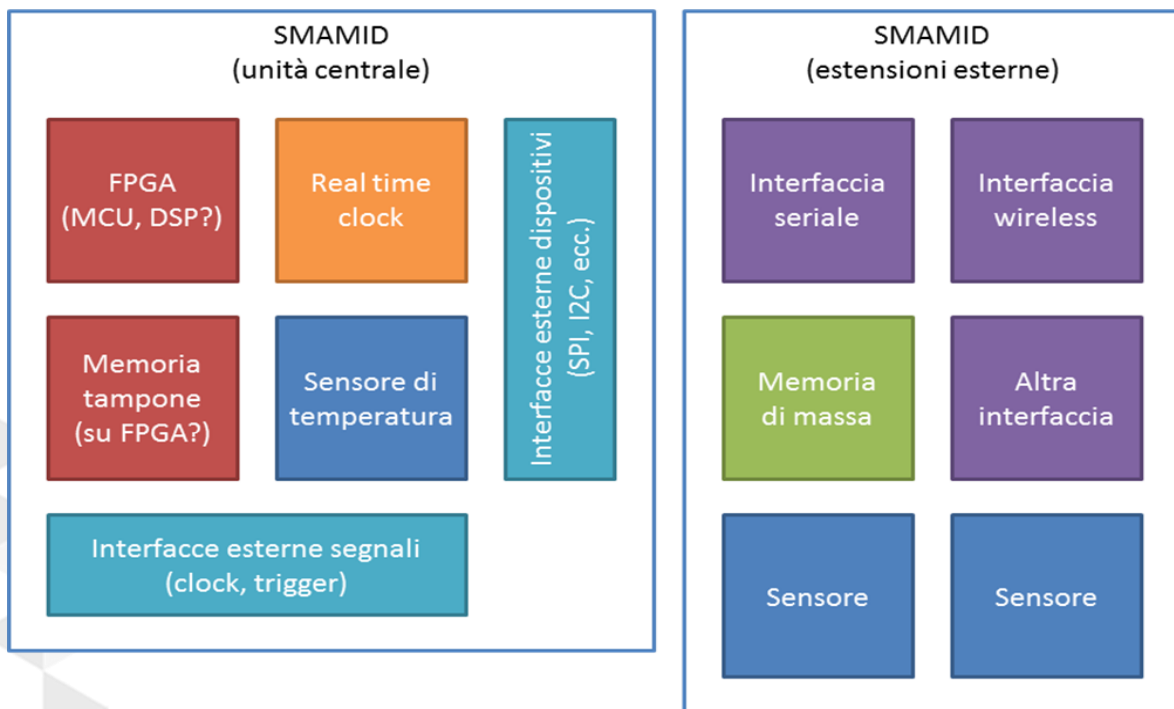


Figura 81. Schema della architettura a due schede ipotizzata

Naturalmente, l'unità centrale dovrà prevedere, oltre alle interfacce attualmente presenti, anche delle nuove interfacce che consentano il collegamento dei dispositivi esterni; in tale configurazione, però, la natura riconfigurabile dell'FPGA può risultare molto utile nella misura in cui consente, sulla base del dispositivo esterno che si deve collegare, la riconfigurazione dei pin esterni su protocolli di tipo diverso.

Questa struttura permette una notevole versatilità, consentendo dunque di estendere notevolmente il campo di applicazioni di SMAMID, sia in termini di misura (potendo montare diversi tipi di sensori, con caratteristiche anche piuttosto differenti), sia di interfaccia. L'uso di un'FPGA consentirebbe dunque di modulare il sistema in maniera specificatamente mirata all'applicazione da implementare.

A livello firmware/HDL, sarà necessario descrivere un nucleo centrale di gestione della parte generale, un modulo di elaborazione dei dati (eventualmente riconfigurabile a seconda dell'esigenza specifica) ed una serie di moduli che consentano di pilotare tutti i dispositivi esterni.

Le possibili nuove criticità di questa implementazione, che viceversa probabilmente risolve tutte le criticità individuate nell'implementazione corrente, sono individuate in:

- probabile aumento dell'assorbimento energetico;
- necessità di programmare usando linguaggi di descrizione dell'hardware (HDL) piuttosto che linguaggi di programmazione;
- netta separazione in moduli della parte firmware/HDL, con la conseguenza di dover verificare la compatibilità dei vari moduli tra loro;
- difficoltà nella progettazione meccanica dei vari dispositivi.

Naturalmente, essendo questa un'ipotesi di lavoro iniziale, non è certamente priva di possibili difetti che potranno essere corretti e/o rivisti durante l'attività di sviluppo vero e proprio.

4. DEFINIZIONE DELLE ESIGENZE FUNZIONALI DEL SISTEMA SMAMID WP2.2

Presentiamo gli schemi dei flussi di elaborazioni dati identificate al fine di incrementare il potere computazionale della rete SWAN nel monitoraggio frane (schema 1). Si aggiungono inoltre schemi analoghi per altri tipi di elaborazioni inerenti altre applicazioni di monitoraggio e diagnostica della rete SWAN quali il

monitoraggio di quadri fessurativi (schema 2) e il monitoraggio delle prestazioni di tappetini antivibranti ferroviari (schema 3).

> 4.1 Schema 1. Monitoraggio frane

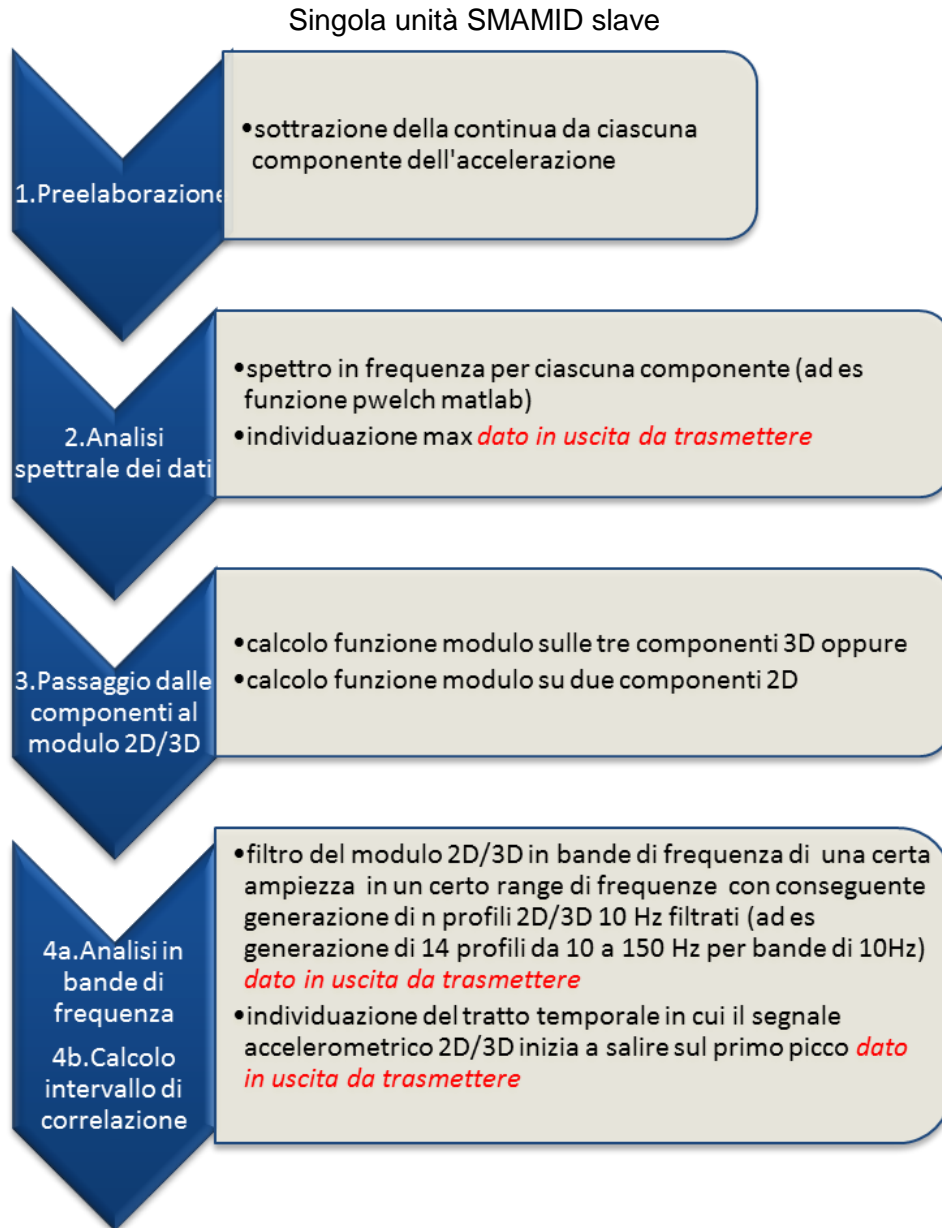
Singola Unità SMAMID slave



Unità SMAMID master (elaborazione di rete SWAN)



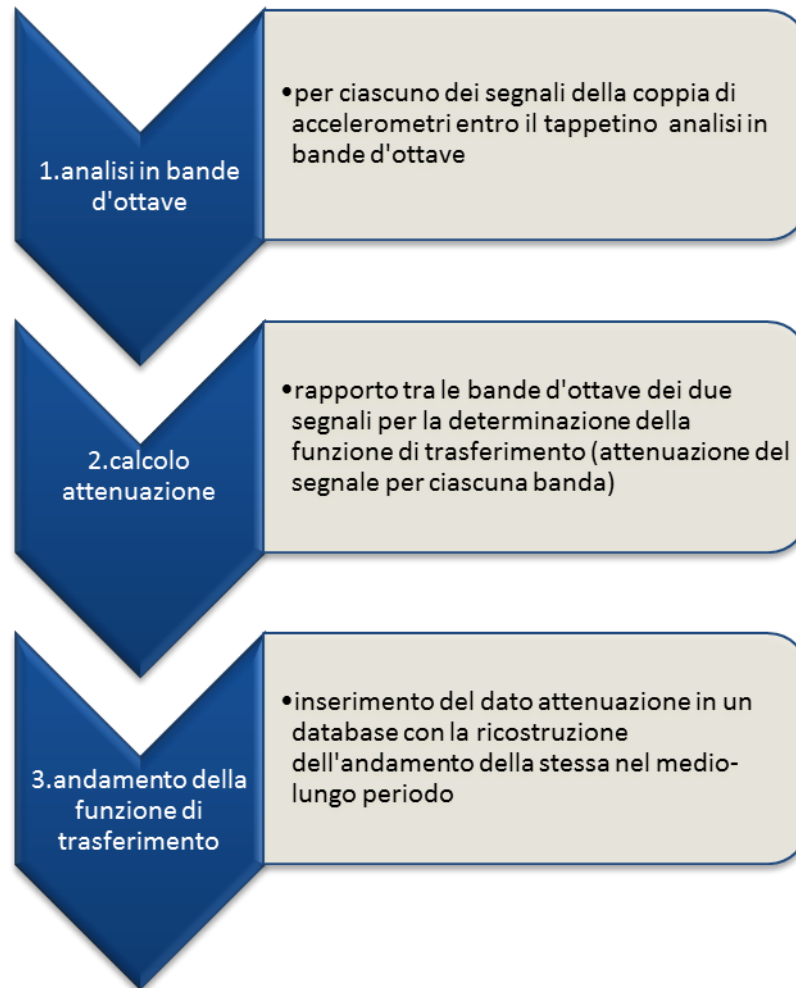
> 4.2 Schema 2. Sistema monitoraggio e rivelazione quadri fessurativi



Unità Master (elaborazione di rete SWAN)



> 4.3 Schema 3. Sistema monitoraggio tappetino strumentato



5. TEST PROTOTIPO SVILUPPATO DAL DEIS

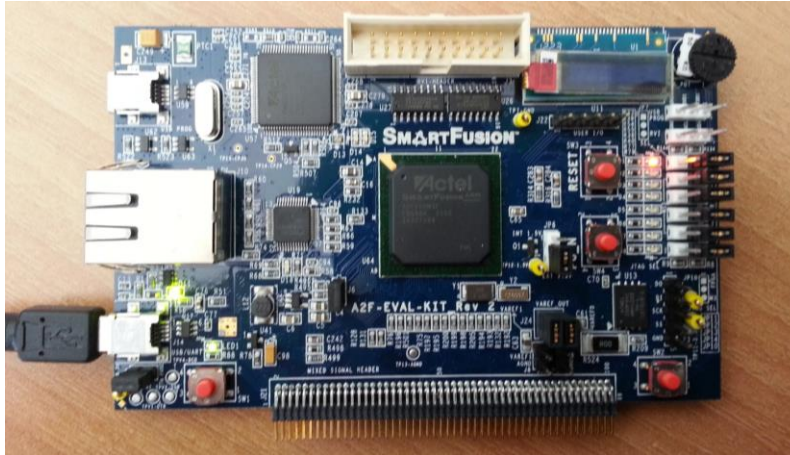


Figura 82. Immagine del prototipo di sistema FPGA sviluppato dal DEIS per STRAGO e testato da STRAGO

Sono state indirizzate le attività di sviluppo svolte dal gruppo DEIS concordando l'implementazione di una scheda accelerometrica con FPGA in cui tutte le operazioni sono a carico del microprocessore nell'FPGA. In estrema sintesi, collegato un accelerometro a una scheda demo e attivato il microcontrollore dentro l'FPGA, è stata istanziata la porta SPI necessaria per pilotare l'accelerometro. Posto l'accelerometro in una configurazione standard, ne è stata indirizzata la lettura sia su una seriale sia (un solo asse) sul display della demo board.

Per pilotare l'accelerometro, sono stati implementati i seguenti step:

- scrivere la configurazione nei registri di configurazione;
- aspettare il segnale di data ready per procedere con la lettura;
- leggere e interpretare correttamente i dati dai registri dati;
- verificare se ci sono dati persi.

Infine si sono resi i dati disponibili all'esterno.

Il sistema SMAMID in FPGA così realizzato dal DEIS è in corso di validazione dal nostro gruppo, che, a valle dell'inserimento dell'accelerometro MEMS utilizzato nell'unità SMAMID, ne sta verificando il corretto funzionamento.

A valle dello sviluppo di una scheda FPGA per il controllo e la gestione di un accelerometro da parte del DEIS e della sua consegna a STRAGO, sono stati svolti test per la verifica del corretto funzionamento del sistema. Impiegando lo stesso accelerometro dell'unità SMAMID, si è appurato che le operazioni di pilotaggio del sensore e di acquisizione e interpretazione dei dati vengono eseguite in maniera puntuale.

Il prototipo sviluppato, in conclusione, risponde alle esigenze di evoluzione architetturale dal punto di vista elettronico di SMAMID nell'ottica di

- sviluppare una unità master dall'elevata capacità computazionale in grado di semplificare lo schema del sistema attuale fondendo la master e la unità centrale di elaborazione (PC host) in un solo sistema di gestione della rete e computazionale per i dati raccolti dalle unità di misura SMAMID;
- migliorare l'impianto hardware generale anche della singola unità SMAMID;
- incrementare le capacità computazionali della singola unità di misura SMAMID per future applicazioni, anche differenti dal monitoraggio frane, in cui il carico computazionale viene distribuito tra le n unità di una rete di misura wireless piuttosto che su un PC centrale. Ciò contribuisce non solo a limitare il carico computazionale dell'unità di elaborazione centrale che potrebbe, in taluni casi (numero di unità di misura molto elevato, algoritmi impegnativi, etc..) divenire molto oneroso, ma anche a snellire il carico di trasmissione dati dalla unità di misura alla unità centrale consentendo di inviare piuttosto che pesanti dati grezzi (profili accelerometrici ad es. per lunghi periodi di tempo), dati elaborati di sintesi molto più "leggeri".

Identificazione specifiche funzionali di comunicazione dati e informazioni tra il sistema di monitoraggio frane e il CAED

Si è preso atto della necessità di eseguire attività supplementari rispetto a quanto previsto nella fase di pianificazione iniziale delle attività per soddisfare l'esigenza di integrare la rete di unità funzionali SMAMID, denominata SWAN, nel sistema globale Early Warning con particolare riferimento al coordinamento delle modalità di comunicazione dei dati della rete SWAN col nodo concentratore/CAED in relazione alle esigenze di monitoraggio del rilievo franoso.

A tal fine è stato necessario partire dalla definizione delle modalità di comunicazione dati e comandi col nodo concentratore/ CAED, coordinandosi e interfacciandosi con i gruppi di lavoro dell'OR5 e OR6.

Si sono svolte attività di studio e di coordinamento con i gruppi di lavoro dell'OR5 e OR6 per definire le configurazioni di comunicazione.

Si è partiti da un'analisi delle possibili modalità di comunicazione dei dati dal sistema SWAN al nodo concentratore (OR5) a sua volta in comunicazione col CAED (OR6). Per chiarire i possibili punti di definizione circa la comunicazione, ricordiamo brevemente che il sistema funziona secondo i seguenti step:

- ciascuna unità SMAMID della rete SWAN misura profili temporali accelerometrici (su tre assi), che restituisce in output digitale tramite conversione A/D interna e su cui esegue, a mezzo del microcontrollore di bordo, una media temporale;
- SWAN è una WSN che opera con un protocollo proprietario in maniera autonoma, ovvero inviando, a valle dell'acquisizione, via wireless i dati grezzi (profili accelerometrici) e i dati mediati a un'unità SMAMID master, che è quindi nodo coordinatore dal lato della WSN inclinometrica, gestendola secondo detto protocollo proprietario, a sua volta collegata a un PC centrale;
- qui i dati possono essere elaborati fino a un livello interpretativo, ovvero prima derivando dai dati accelerometrici mediati i valori di inclinazione, poi confrontando il pattern degli spostamenti superficiali con condizioni di

soglia, indicate dalla modellazione, e segnalando eventuali condizioni di allerta.

È da prevedersi dunque un collegamento al PC industriale tramite opportuno supporto dal lato del nodo concentratore sviluppato nell'OR5 e in comunicazione col CAED.

Anche al fine di definire e sviluppare il software di interfacciamento della WSN inclinometrica con la rete OR5, si sono poste delle questioni, e i taluni casi si sono risolte, circa le modalità di interazione tra la stessa e la rete OR5, se, ad es:

- SWAN sia attiva o passiva rispetto alla comunicazione;
- l'elaborazione dei dati mediati fino a un livello interpretativo sia a carico del PC centrale o del CAED;
- nel primo caso, ovvero di elaborazione svolta presso PC centrale di SWAN, debbano essere trasmessi solo i dati di sintesi delle elaborazioni o piuttosto anche i dati grezzi in vista soprattutto della loro utilità per eventuali ulteriori elaborazioni/verifiche;
- bisogna prevedere la possibilità che, in caso di individuazione di condizioni di allerta da parte della WSN inclinometrica, il CAED possa intervenire sui parametri di acquisizione di SWAN (aumentando, ad es. la frequenza di acquisizione).

Circa l'elaborazione dei dati si è preferito operare una elaborazione dei dati mediati di accelerazione già su PC centrale di SWAN, conservando al contempo l'opzione di inviare al nodo concentratore/CAED sia i dati elaborati che i dati grezzi, oltre che eventuali allarmi. Queste scelte, che hanno contestualmente e coerentemente orientato la progettazione del software di gestione di SWAN, sono state dettate dalla necessità di centrare l'obiettivo che STRAGO si pone in generale di gestire la misura del sistema di monitoraggio in maniera complessiva dal punto di vista impiantistico e sensoristico come della catena acquisizione/trasmissione/memorizzazione dati incluso il ciclo analisi/elaborazione/interpretazione della misura. In particolare, nel caso presente, in virtù degli esiti dell'AE 2.2.2, in relazione alla interazione col fronte modellazione, è attesa la possibilità di pervenire all'interpretazione corretta del dato di spostamento superficiale in termini di livello di criticità delle condizioni del rilievo franoso.

Circa l'ultimo punto, la possibilità di intervenire sui parametri di acquisizione di SWAN è lasciata aperta sia per SWAN da PC centrale che per il CAED.

Sono state definite ulteriori specifiche al fine di identificare completamente il quadro della comunicazione tra SWAN e il nodo concentratore (OR5):

- la frequenza di campionamento del sensore accelerometrico è 40 Hz, mentre la frequenza con cui avvengono le acquisizioni può essere stimato in 15 minuti;
- la durata dell'acquisizione è tipicamente 1s;
- il numero massimo di nodi sensore per ogni installazione: per il tronco della A3 4 nodi sensore su una sottounità e 6 su una seconda sottounità; per il tronco della A18 2 nodi sensori; sulla A16 è da definire;
- la formalizzazione del layout del pacchetto dati: viene fornito un file contenente i dati dei valori medi delle accelerazioni, del pattern delle inclinazioni, dello stato del sistema.

Sono state svolte, successivamente alla conclusione delle presenti attività, prove di comunicazione tra il sistema prototipale sviluppato in laboratorio di SWAN e il nodo concentratore (OR5) con esito positivo.

Riferimenti bibliografici

[1]http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2005/rischi-naturali/2.4lefrane_superficiali/at_download/file

[2]APPLICAZIONE DI TECNOLOGIE AVANZATE PER IL MONITORAGGIO DI FENOMENI DI DINAMICA DI VERSANTE. P. ALLASIA ET AL, LA DIFESA DELLA MONTAGNA CONVEGNO NAZIONALE. ASSISI 11-12 DICEMBRE 2002

[3]“LINEE GUIDA PER LA SALVAGUARDIA DEI BENI NATURALI DAL RISCHIO FRANA”- FASCICOLO II “LINEE GUIDA PER IL RISCHIO FRANE” [HTTP://WWW.AFS.ENEA.IT/PROTPREV/WWW/LINEEGUIDA2/LINEEGUIDAII .HTM](http://www.afs.enea.it/protprev/www/lineeguida2/lineeguidaii.htm)

[4]F FALASCHI ET AL, METODOLOGIE DI VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DI FRANA IN ALCUNE AREE CAMPIONE DELLA TOSCANA SETTENTRIONALE, ATTI DELLA SOC TOSC SCIE NAT, MEM, SERIE A, PAG 21-39, 2007

[5]A BIASION ET AL, MONITORAGGIO DI EVENTI FRANOSI IN ROCCIA CON TECNICHE LASER-SCANNER, BOLLETTINO SIFET 3/2004

[6]F PEDRIELLI ET AL FISICA E...IL NUOVO SAGGIATORE VOL 26 N 5-6 2010 PAG 36-46

[7][HTTP://WWW.ARPA.PIEMONTE.IT/UPLOAD/DL/GEOLOGIA_E_DISSESTO/URP_T040_2.PDF](http://www.arpa.piemonte.it/upload/dl/geologia_e_dissesto/urp_t040_2.pdf)

[8]<http://gisweb.arpa.piemonte.it/arpagis/index.htm>

[9]L. BONCI ET AL, RISCHI GEOLOGICI IN AREE URBANE: DUE ESEMPI DI MONITORAGGIO IN EMERGENZA CON “STAZIONE TOTALE” 7A CONFERENZA NAZIONALE ASITA – VERONA – 28-31 OTTOBRE 2003

[10] O. CARACCIOLIOGIORNALE DI GEOLOGIA APPLICATA 2 (2005) 217–226, DOI: 10.1474/GGA.2005–02.0–31.0057 PRIMI RISULTATI DAL CONFRONTO TRA TECNICHE GEOMORFOLOGICHE CONVENZIONALI E L'INTERFEROMETRIA DIFSAR: APPLICAZIONE PER L'ANALISI DI MOVIMENTI IN MASSA IN AREE PERI - URBANE (CALABRIA, ITALIA)

[11]CORSO DI LABORATORIO MONITORAGGIO FRANE - STRUMENTAZIONE GEOTECNICA DI MONITORAGGIO

<http://geotecnica.dicea.unifi.it/strumentazione.pdf>

Strumentazione geotecnica per il monitoraggio frane

1. STRUMENTAZIONE GEOTECNICA DI CONTROLLO DELLE PRESSIONI E DEI MOVIMENTI

> 1.1 Generalità

Prima di entrare in merito alla strumentazione geotecnica impiegata per il monitoraggio delle pressioni e dei movimenti è bene ricordare quali sono gli impieghi della strumentazione geotecnica, che cosa si intende con il termine “strumentazione geotecnica”, a quali domande deve rispondere un programma di monitoraggio e quali sono gli strumenti più adatti a rispondere agli obiettivi prefissati. Dopo l'introduzione di questi concetti basilari verranno descritti i principali strumenti impiegati nei monitoraggi geotecnici; in particolare la strumentazione impiegata per il monitoraggio delle pressioni nei terreni, effettuate mediante i piezometri, qualora si voglia misurare le pressioni neutre, determinate mediante celle di pressione qualora si sia interessati al valore delle pressioni totali. Infine saranno riportati gli strumenti utilizzati per il monitoraggio dei movimenti nei terreni, effettuate mediante assestimetri, qualora ad esempio interessi il movimento di due o più punti lungo un asse, oppure effettuate mediante inclinometri, qualora interessi lo spostamento di più punti perpendicolarmente ad un asse[11].

> 1.2 Impieghi della strumentazione geotecnica

La strumentazione geotecnica può avere sia una funzione di controllo su opere esistenti o in corso di realizzazione sia la funzione di determinare i parametri di interesse geotecnico, nella prima fase conoscitiva, in vista del progetto di opere da insediarsi sul territorio. Il primo di tali impieghi è quello che sarà affrontato, ovvero, la strumentazione utilizzata direttamente nelle indagini in sito allo scopo di monitorare opere esistenti o in corso d'opera; in seguito ci si riferirà a queste parlando di strumentazione geotecnica.

In fase di realizzazione di un'opera la strumentazione geotecnica può essere utilizzata per valutare se sono soddisfatte le condizioni di sicurezza (ad es. per

un vicino manufatto); per l'acquisizione di dati che possono comportare modifiche in corso d'opera con variazione dei costi (ad es. prove di carico su pali pilota); come protezione legale (ad es. può nascere un contenzioso con i vicini a seguito della realizzazione di opere geotecniche).

La strumentazione geotecnica utilizzata per il monitoraggio di opere a rischio permette di individuare l'evoluzione geomorfologica del territorio con le seguenti tre finalità:

- a) valutare le condizioni di stabilità attuali e future mediante lo studio e la previsione dell'evoluzione dei movimenti e degli sforzi;
- b) utilizzare sistemi di allerta e di allarme;
- c) scegliere i più opportuni sistemi di consolidamento.

La finalità a) ha la funzione di verifica e di approfondimento dei risultati dei rilievi e dei sopralluoghi svolti e dei dati forniti dai presidi territoriali. Mediante la messa in opera di strumenti di adeguate caratteristiche, capaci di misurare con elevata precisione le intensità di pioggia, i livelli piezometrici in punti significativi del sottosuolo, gli spostamenti superficiali e profondi delle coltri instabili o a rischio di frana, l'apertura di fratture e fessure, eventuali stati di sforzo sulle strutture presenti nelle aree a rischio, è possibile tenere sotto controllo sia le azioni capaci di produrre instabilità che i corrispondenti comportamenti delle opere a rischio. Il controllo continuo di queste ultime consentirà di decidere le più opportune azioni da intraprendere per la mitigazione del rischio.

L'adozione di sistemi di allerta o di allarme (finalità b) viene effettuata in tutte le situazioni di pericolo imminente in cui non sia possibile la delocalizzazione degli insediamenti e delle infrastrutture e fino a che non siano state realizzate opere definitive di consolidamento.

Tali sistemi sono basati sulla misura di alcuni parametri fisici caratteristici del fenomeno (intensità di pioggia, pressioni neutre o suzioni in alcuni punti del sottosuolo, apertura delle fessure in un ammasso roccioso ecc.) caratteristici dei fenomeni in atto e che si ritiene ne controllino l'evoluzione.

Il monitoraggio contribuisce alla raccolta degli elementi necessari per la progettazione degli interventi di consolidamento nonché per verificarne l'efficacia (finalità c).

> 1.3 Componenti della strumentazione

La complessità degli strumenti geotecnici è essenzialmente dovuta al fatto che la maggior parte delle misure viene fatta in modo indiretto. Questo porta spesso a considerare come strumento un unico apparecchio mentre con il termine strumentazione è da intendersi la somma di tre componenti:

1- SENSORE

(preleva il segnale trasformandolo generalmente in una grandezza diversa)

2- CONDUTTORE

(trasferisce il segnale dal sensore all'unità di lettura)

3- UNITÀ DI LETTURA

(decodifica il segnale dando la misura della grandezza a cui si riferisce).

Per una buona qualità della misura sarà quindi necessaria l'efficienza delle singole componenti. Sono poi da considerare unitamente alla strumentazione geotecnica le seguenti prestazioni:

- il progetto del sistema di misura inteso come scelta delle grandezze da misurare, della posizione dei punti di misura e la scelta del tipo di strumento da utilizzare;
- l'installazione degli strumenti e dei conduttori;
- l'esecuzione delle letture.

> 1.4 Pianificazione dei programmi di monitoraggio

Anche il monitoraggio strumentale richiede un apposito progetto, progetto del sistema di misura, che precisi e giustifichi tipo, numero e layout degli strumenti, oltre che la frequenza e le modalità delle misure.

Tale progetto verrà redatto da un tecnico di documentata esperienza nel campo e il programma di monitoraggio strumentale sarà affidato a ditte specializzate nel settore.

La scelta del tipo di sensori dipenderà dalle caratteristiche dei fenomeni che si intende osservare. Essi devono avere adeguate caratteristiche di *sensibilità*, *durabilità* e *stabilità nel tempo* che deve essere giustificata dal progettista. Gli strumenti vanno adeguatamente protetti da possibili azioni esterne (non necessariamente legate ad atti di vandalismo) che ne alterino il funzionamento o le mettano fuori uso: nel caso di piezometri idraulici, i tubi vanno isolati dall'esterno per evitare l'accesso di acqua direttamente dal piano di campagna;

nel caso di piezometri elettrici, i cavi devono essere protetti da possibili tranciamenti dovuti ad esempio a macchine in movimento; ecc.

La *durata del monitoraggio* sarà di norma quella sufficiente a raccogliere i dati necessari per il raggiungimento delle finalità del monitoraggio stesso. Nel caso queste consistano nella elaborazione di un progetto di consolidamento, sarà buona norma estendere il periodo di misure fino alla esecuzione del progetto ed eventualmente anche dopo, perché la strumentazione possa acquisire la funzione di controllo della efficacia degli interventi stessi.

In molti casi, e soprattutto quelli in cui i segni premonitori dei fenomeni franosi sono deboli e di breve durata (tipicamente per i crolli in roccia e le colate in terreni incoerenti e piroclastici), è opportuno adottare *sistemi in continuo* con trasmissione dei dati via cavo o etere.

Non ultimo, in termini di importanza ed incidenza su un programma di monitoraggio, è da considerare *l'aspetto economico*. Nel problema di ottimizzazione della valutazione della sicurezza di un'opera esistente, oppure nel problema della messa in sicurezza di una opera a rischio, (nel senso più generale, sia in termini di monitoraggio preliminare, sia nella scelta delle grandezze fisiche da monitorare e dei sistemi di misura da utilizzare, sia nel dimensionamento degli interventi di una consolidazione eventuale), spesso ha un ruolo determinante l'aspetto economico. Il progetto di un programma di monitoraggio deve essere affrontato e risolto considerando nel costo totale, oltre alle spese vive dei monitoraggi, anche una capitalizzazione del rischio. Quindi l'optimum, in termini economici, non sarà semplicemente un minimo della funzione costo totale ma sarà, auspicabilmente, *il punto di incontro della funzione costo del monitoraggio con quella rappresentante la capitalizzazione del rischio*. Il tutto, ovviamente senza prescindere dalla deontologia professionale e dal rischio di vite umane.

> 1.5 Obiettivi del monitoraggio

Il monitoraggio riguarda tutte le grandezze fisiche che consentano di ricostruire ovvero di controllare il comportamento di opere a rischio. Le variabili geotecniche d'interesse nonché gli strumenti utilizzati sono riassunti nel seguente specchio:

VARIABILI	STRUMENTI
Pressioni interstiziali e livello dell'acqua nel terreno	Piezometri
Tensioni totali	Celle di pressione
Cedimenti e spostamenti	Assestimetri e inclinometri
Accelerazioni	Accelerometri
Temperature	Termometri

Per quanto riguarda le grandezze fisiche da monitorare in un programma di monitoraggio e gli strumenti più adatti a rispondere agli obiettivi prefissati si riporta a titolo di esempio la schematizzazione di cinque problemi specifici:

- 1- Gallerie in terreni caotici
- 2- Gallerie in roccia
- 3- Frane in materiali fini
- 4- Dissesti in versanti rocciosi
- 5- Pendii e rupi su cui sorgono centri abitati

1 - Gallerie in terreni caotici

La strumentazione indispensabile per definire nel tempo la deformata della sagoma scavata è riportata in figura 1.

Misuratori di convergenza: sono posizioni a 45° rispetto alla superficie di calpestio, per non intralciare i lavori, permettono di determinare gli spostamenti tra due punti a qualsiasi distanza.

Piezometro a circuito chiuso: sono fondamentali nella fascia allentata (fascia in cui il grado di coesione tra gli strati risulta precario a seguito dello scavo).

Celle di pressione: permettono di determinare la spinta del terreno sul rivestimento.

Estensimetri ad asta: permettono di determinare le variazioni di distanza relativa tra più punti. Ne esistono anche a barretta per misurare le deformazioni durante l'esercizio, consentono il calcolo degli sforzi ai quali è collegata.

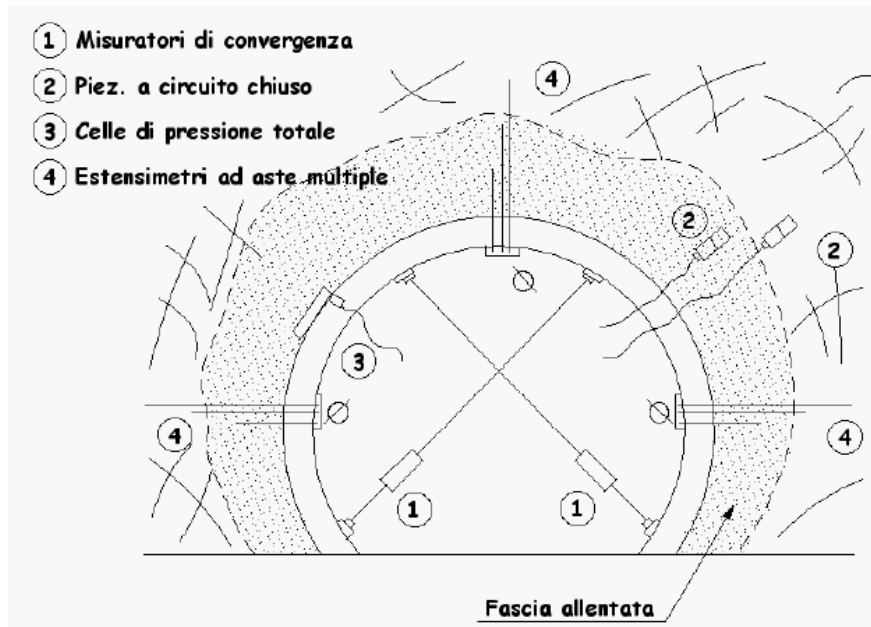


Figura 1. Schematizzazione del monitoraggio di gallerie in terreni caotici

È rappresentato da un sensore collegato ad un'asta di sezione quadrata che può ad esempio essere saldata ai ferri d'armatura di una struttura in c.a.. Sul rivestimento per controllare le variazioni di ampiezza di eventuali fessure nel cls possono essere impiegati misuratori di giunti.

2 - Gallerie in roccia

La strumentazione impiegata è essenzialmente uguale a quella impiegata per le gallerie in terreni caotici, vedi figura 2. La deformabilità di queste gallerie è minore e la fase di collasso si può presentare improvvisa e con il distacco di blocchi. L'uso dei piezometri a circuito chiuso è inutile se non nel caso in cui siano presenti venute d'acqua concentrate. In questo caso i piezometri vengono installati in prossimità del fenomeno per controllare, una volta completato il rivestimento, il nuovo percorso che l'acqua va a intraprendere. In gallerie dove sono previste tirantature è possibile prevedere l'impiego di celle di carico toroidali.

3 - Frane in materiali fini

La strumentazione spesso impiegata nel monitoraggio geotecnico di pendii in materiale fine è schematizzata in figura 3a). In questo tipo di terreno lo strumento

specifico è l'inclinometro, che inserito nel terreno fino ad una quota inferiore a quella del piano di scorrimento, consente di misurare la velocità di avanzamento della frana e di dedurre la dimensione del fenomeno. Qualora si volesse la registrazione continua nel tempo degli spostamenti si installerà una colonna di inclinometri fissi che con un sistema automatizzato permette di acquisire ed elaborare i dati rilevati.

In terreni coesivi verranno installati, il più vicino possibile alla superficie di scorrimento individuata o presunta, dei piezometri a circuito chiuso per la misura delle pressioni neutre e verranno installate delle celle di pressione per la misurazione delle pressioni totali.

In terreni molto permeabili in alternativa ai piezometri a circuito chiuso si potranno utilizzare dei piezometri idraulici aperti.

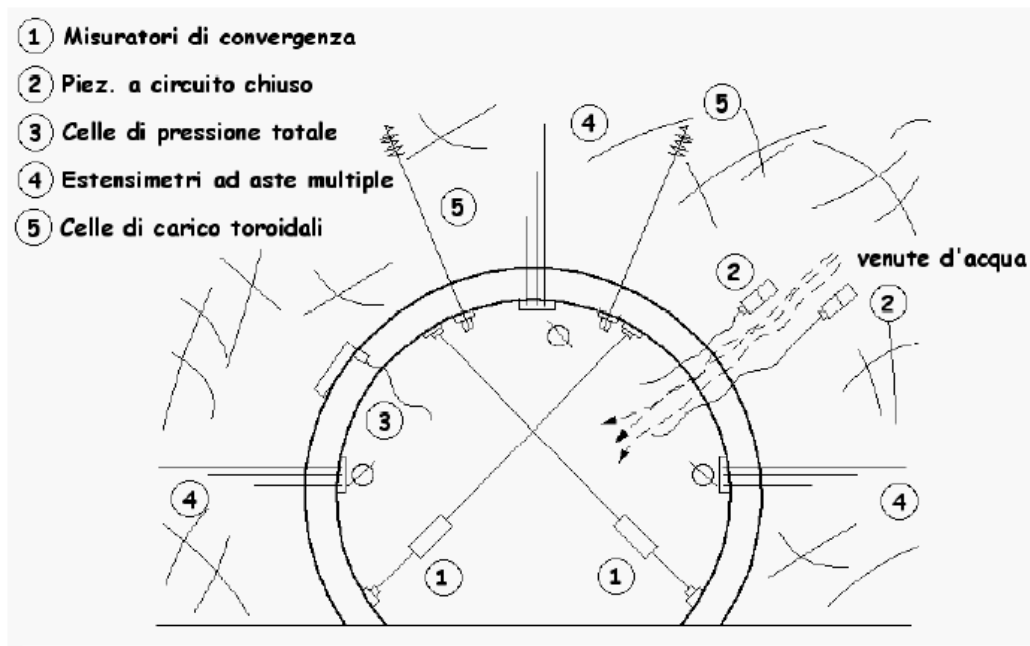


Figura 2. Schematizzazione del monitoraggio di gallerie in roccia

4 - Dissesti in versanti rocciosi

In questo tipo di formazione l'entità degli spostamenti, prima del crollo, è generalmente molto piccola e spesso inavvertibile. È quindi necessario installare strumenti dotati di maggior precisione e anche con tempi di risposta minori. Al tubo inclinometrico sono preferibili le colonne di inclinometri fissi. Per la misura delle deformazioni dei diversi strati di roccia è adatto l'impiego di estensimetri a base lunga. Si utilizzano poi piezometri idraulici aperti. È necessario avere il maggior numero di informazioni possibili sui micromovimenti della roccia. Con una serie di controlli in superficie si possono misurare le variazioni di ampiezza delle fratture con dei misuratori di giunti e la stabilità di massi pericolanti con inclinometri fissi di superficie. Talvolta è opportuno effettuare un controllo delle variazioni termiche superficiali mediante termometri a resistenza al fine di depurare gli spostamenti rilevati dalle dilatazioni termiche proprie del materiale. La strumentazione generalmente impiegata nel monitoraggio dei dissesti in versanti rocciosi è schematizzata in figura 3b).

5 - Pendii e rupi su cui sorgono centri abitati

La strumentazione generalmente indispensabile per lo studio dei movimenti franosi in versanti su cui sorgono centri abitati è schematizzata in figura 4.

Per quanto riguarda le specifiche tecniche di ciascuna categoria di strumentazione, e quindi quali sono i vantaggi ed i limiti dell'impiego di un strumento piuttosto che un altro, si rimanda ai paragrafi seguenti, nei quali, dopo avere descritto la strumentazione e la sua installazione, ne sarà effettuata una analisi critica in funzione delle applicazioni in cui è impiegata.

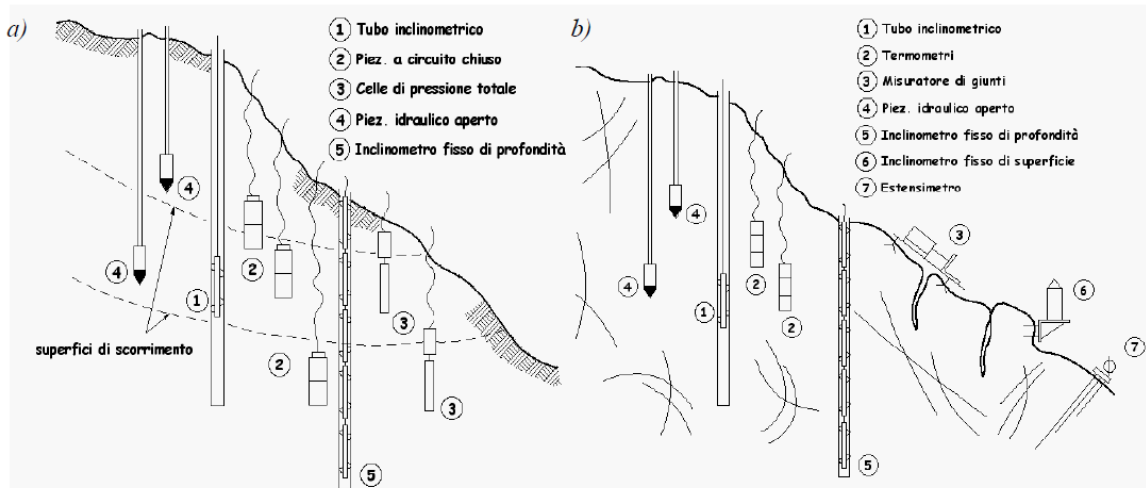


Figura 3: Schematizzazione del monitoraggio di: a) frane in materiali fini; b) dissesti in versanti rocciosi

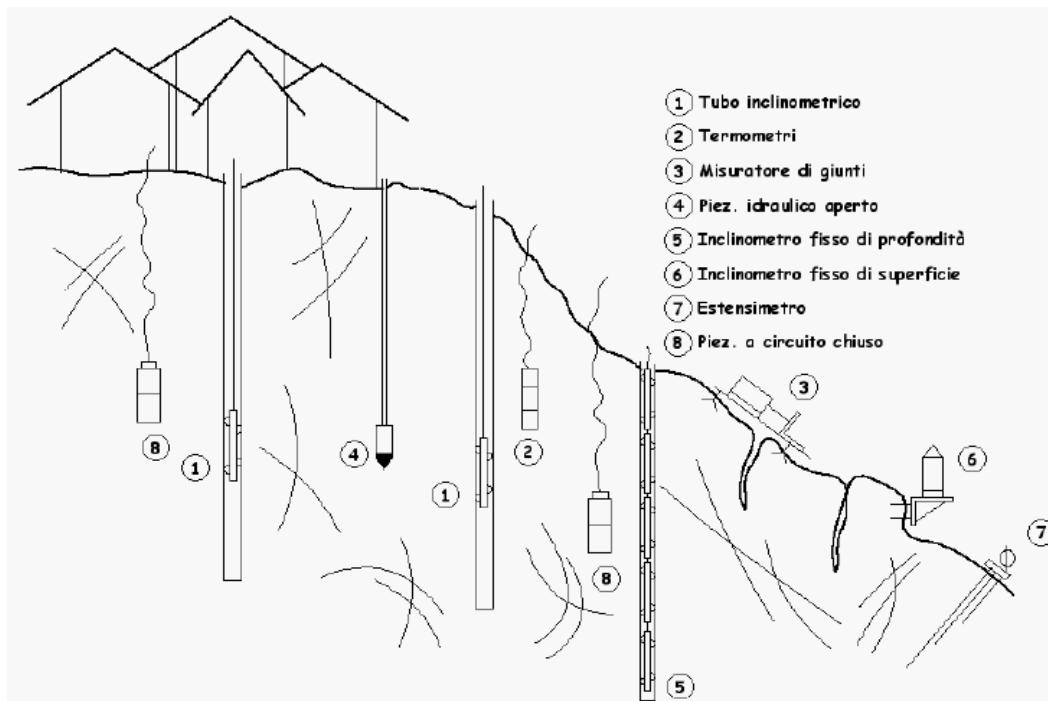


Figura 4. Schematizzazione del monitoraggio di pendii e rupi su cui sorgono centri abitati

2. PIEZOMETRI

I piezometri sono strumenti utilizzati per monitorare la pressione interstiziale dell'acqua nel terreno; hanno due categorie di applicazioni:

- il monitoraggio del livello di acqua nel terreno;
- la determinazione del valore delle pressioni neutre.

Generalmente i piezometri utilizzati per misurare la pressione interstiziale nei terreni non sono diversi da quelli usati per la misura della pressione dell'acqua nei giunti delle masse rocciose: le differenze stanno nel metodo di installazione. I piezometri possono essere suddivisi in due categorie: quelli in cui è presente un diaframma tra acqua nel terreno e trasduttore (p. a trasduttore pneumatico, a corda vibrante o a resistenza elettrica); e quelli in cui il diaframma non è presente (p. aperti a tubo fisso e idraulici a due tubi). Generalmente con il termine piezometri s'intende uno strumento che misura la pressione interstiziale dell'acqua di un ben preciso strato di terreno, viceversa si parla di pozzo di osservazione.

Quando occorre determinare il livello dell'acqua nel terreno si ricorre all'impiego di pozzi di osservazione e piezometri aperti mentre, quando occorre determinare la pressione del fluido interstiziale, si impiegano piezometri muniti di trasduttori di pressione: piezometro idraulico a due tubi, piezometri pneumatici, piezometri a corda vibrante e piezometri elettrici.

> 2.1 Pozzo di osservazione

Il pozzo di osservazione, riportato in figura 5a), consiste in un tubo, installato in un foro di sondaggio, di plastica o acciaio e finestrato nella parte inferiore. L'intercapedine tra il tubo ed il foro viene riempita con sabbia e ghiaia creando così una connessione tra i diversi strati di terreno: la parte superiore viene sigillata con cemento e bentonite per impedire infiltrazioni di acqua dalla superficie. Per lo stesso motivo si pone un tappo sulla sommità del tubo, tale tappo presenta un foro di collegamento con l'esterno affinché la pressione dell'aria sovrastante il livello dell'acqua nel tubo si mantenga pari alla pressione atmosferica. A causa del fatto che si crea una connessione verticale tra gli strati, le applicazioni dei pozzi di osservazione sono limitate al caso di terreni omogenei permeabili non fessurati (con permeabilità secondaria trascurabile) in cui la

pressione dell'acqua aumenta uniformemente con la profondità. In tal caso non è necessario sigillare il tratto finestrato, e l'installazione può essere effettuata direttamente con una qualunque tecnica d'infissione. Se il pozzo attraversa strati di terreno o roccia a diversa permeabilità il livello registrato sarà probabilmente quello corrispondente allo strato a maggiore permeabilità. Considerato il volume d'acqua che deve fluire verso il tubo in presenza di un'eventuale perturbazione che modifichi l'equilibrio idraulico originario, questo piezometro è adatto a terreni di elevata permeabilità ($K > 10^{-6}$ m/s). Per rilevare la quota piezometrica viene calata nel tubo una sonda di misura di cui si dirà in seguito.

> 2.2 Piezometro aperto a tubo fisso

Si differenzia dal pozzo di osservazione per il fatto che, affinché l'elemento filtrante poroso misuri la pressione interstiziale di un ben preciso strato di terreno, l'intercapedine viene sigillata al di sopra dello strato che si vuol monitorare con cemento e bentonite, vedi figura 5b). Qualora esista la possibilità di infiltrazioni indesiderate dal basso si pone in opera, nel foro di sondaggio, al di sotto dello strato di interesse, un tampone impermeabile.

Consiste di una colonna di tubi in PVC rigido o in metallo, fessurati ed eventualmente rivestiti di tessuto non tessuto per la parte in falda e ciechi per il rimanente tratto.

Vanno posti in opera entro un foro rivestito con una tubazione provvisoria, di diametro utile pari almeno al doppio del diametro dei tubi di misura adottati. Una volta eseguita a quota la pulizia del foro, si inserisce la colonna fino a fondo foro; quindi si procede all'immissione, nell'intercapedine colonna - tubazione, di materiale granulare (sabbia, sabbia - ghiaietto) in modo da realizzare un filtro poroso attorno al tratto di colonna finestrato.

Tale operazione va eseguita ritirando la tubazione provvisoria mano a mano che si procede con l'immissione dall'alto del materiale filtrante, curando di controllare la quota di questo con idonei sistemi di misura (cordelle metriche, etc.). Il bordo inferiore della tubazione dovrà sempre trovarsi al di sotto della quota raggiunta dal materiale di riempimento.

Al termine della formazione del filtro, si procede all'esecuzione di un tappo impermeabile di circa 1 metro di altezza, formato generalmente da palline di bentonite o argilla opportunamente pestellate, onde separare la zona filtrante dal tratto di foro superficiale, che andrà poi riempito con materiale di risulta, oppure

cementato a seconda delle esigenze. In superficie, si provvede quindi ad eseguire un idoneo pozzetto, possibilmente con chiusura a lucchetto o simili, per il contenimento e la protezione della testa del piezometro.

I vantaggi del piezometro aperto a tubo fisso sono:

- l'affidabilità dei dati registrati;
- ha effettuato con successo lunghe serie di registrazioni;
- l'autodegassazione se il diametro interno del tubo è adeguato;
- l'integrità dei sigilli può essere valutata dopo l'installazione;
- la possibilità di essere convertito in un piezometro a diaframma;
- la possibilità di essere usato per misure di permeabilità.

I principali limiti del piezometro aperto a tubo fisso sono:

- tempi di risposta lunghi;
- può essere soggetto a danneggiamenti durante l'installazione o in seguito a compressione del terreno circostante;
- l'inserimento di un piezometro in un argine crea una zona di discontinuità a minor grado di compattezza;
- il filtro poroso può ostruirsi in seguito a ripetuti flussi d'acqua in ingresso e in uscita;
- i modelli ad infissione sebbene meno costosi sono limitati dalla mancanza di un sigillo adeguato, dalla possibilità d'intasamenti e di false misure nel caso penetri, dal terreno, del gas nel tubo.

Piezometro di Casagrande

Per ottenere una risposta più rapida, in terreni con permeabilità minore a 10^{-6} m/s si impiega il piezometro di Casagrande (1949-1958). Questo tipo di piezometro è sempre un piezometro aperto a tubo fisso, ed è costituito, vedi figura 6, da un elemento filtrante, rappresentato da un cilindro in pietra porosa o in polietilene poroso ad alta densità del diametro di 30-50mm e della lunghezza di 200-300mm. L'estremità superiore della pietra porosa è collegata ad un tubo di piccola sezione o da due tubi in PVC o in nylon ricoperti da polietilene, con diametro interno generalmente di 12.5mm, per il raccordo in superficie. In un foro di sondaggio possono anche essere posti in opera due piezometri di Casagrande a diverse altezze. Nel caso si preveda la posa in opera di due piezometri a diverse profondità nello stesso foro, il diametro minimo utile dovrà essere di 110 mm.

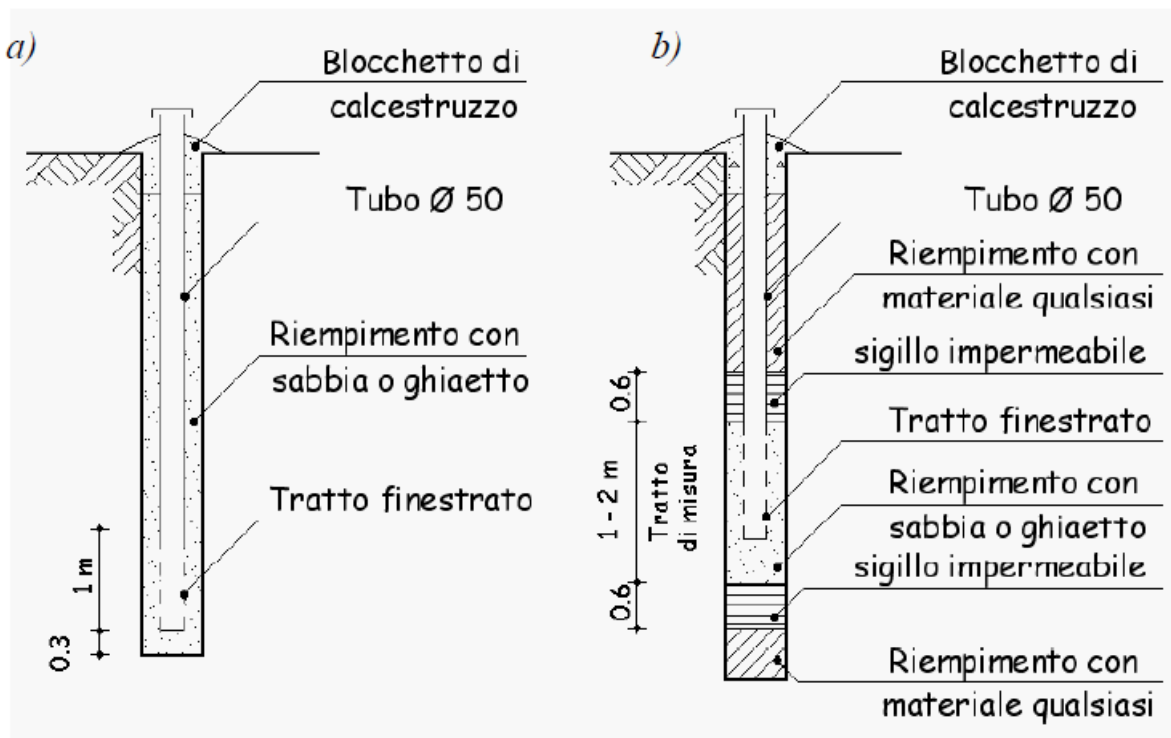


Figura 5. a) pozzo di osservazione; b) piezometro aperto a tubo fisso

L'installazione prevederà due zone filtranti all'interno delle celle porose e due tappi impermeabili. La zona filtrante e il tappo impermeabile, contenuti tra le quote di posa dei due piezometri, dovranno essere dimensionati in altezza in funzione della stratigrafia e dell'individuazione degli strati permeabili ed impermeabili.

Installazione del piezometro di Casagrande

Per l'installazione del piezometro di Casagrande si procede nel seguente modo, vedi figura 6:

1. a sondaggio ultimato, con il rivestimento in opera, si forma un tappo di fondo con malta di cemento, bentonite e acqua (con parti in peso rispettivamente pari al 32%-4%-64%), fino a 0.5m al di sotto della quota prevista per il piezometro;
2. si pone in opera un filtro dello spessore di 0.5m e diametro delle particelle 1.4mm, ritirando man mano il rivestimento;

3. si pone in opera il piezometro, collegando accuratamente il tubo di risalita, i giunti tra i vari segmenti di tubo devono avere una tenuta perfetta;
4. si realizza intorno e sopra il piezometro un filtro di sabbia pulita di spessore 0.5m, ritirando gradualmente il rivestimento;
5. si esegue un sigillo impermeabile, costituito da alternanze di palline di bentonite (del diametro di 20mm) e ghiaietto, di spessore 0.5-1.0m;
6. si realizza uno strato (di 0.5-1.0m) di sabbia pulita e un secondo sigillo impermeabile;
7. infine, si riempie il foro, preferibilmente con malta di cemento, bentonite, acqua, colata attraverso delle aste che arrivano a fondo foro, la parte terminale viene sigillata con un blocchetto di calcestruzzo.

È importante che, sia durante queste operazioni che durante la trivellazione, il livello d'acqua sia mantenuto pari o al di sopra del livello di falda iniziale, in modo da minimizzare gli effetti di disturbo conseguenti al flusso d'acqua che tende ad instaurarsi verso il foro in seguito alla perforazione. Nel caso si operi su roccia, la procedura è sostanzialmente la stessa, occorre inoltre fare attenzione che il foro di sondaggio intersechi parecchie fratture nella roccia; il foro deve essere lavato completamente con acqua per ripulire le fratture prima di inserire il filtro sabbioso, che deve essere più alto di quelli usati nei terreni.

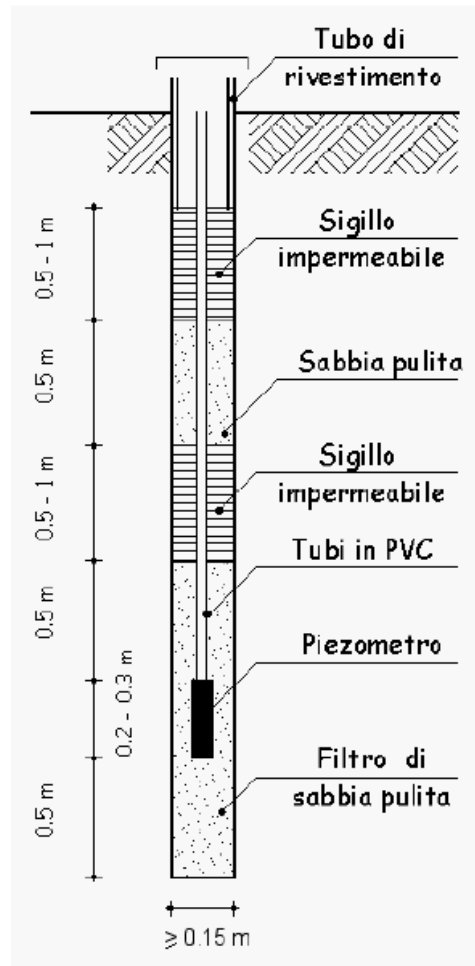


Figura 6. Schema di installazione del piezometro di Casagrande 9

Piezometri Infissi

In argille tenere si può ricorrere a piezometri infissi, riportati in figura 7; l'infissione può avvenire direttamente dalla superficie o dal fondo di un foro di sondaggio. Durante l'infissione l'elemento poroso è protetto da un manicotto che ne impedisce eventuali danneggiamenti e occlusioni; raggiunta la quota di misura il manicotto viene sollevato per mezzo delle aste di spinta e l'elemento poroso rimane in contatto diretto col terreno in quanto non è presente un filtro sabbioso intorno ad esso. In questi casi non viene effettuato un sigillo al di sopra della

quota di misura. Dato che durante l'infissione si crea, intorno al piezometro, una zona di sovrappressione, occorre attendere che questa si dissipi per una misura corretta del livello piezometrico. Con strumenti di piccole dimensioni questo tempo di attesa è dell'ordine dei 20-30 gg. Sono stati progettati anche dei modelli che consentono l'infissione, senza danneggiamenti, in terreni contenenti pietre e strati rigidi, e modelli che utilizzano trasduttori a diaframma. La loro diffusione è legata essenzialmente alla facilità d'impiego e al basso costo.

Metodi di lettura in piezometri aperti

Esistono vari metodi di lettura del livello dell'acqua nei piezometri a tubo fisso. Il più comune è la sonda galvanometrica (detta anche freatimetro) calata nel tubo fisso, riportata in figura 8. Consiste in due conduttori collegati ad un'estremità agli elettrodi di una batteria, ed all'altra ciascuno con un cilindro di acciaio inox diviso in due parti da un isolante di plastica. Quando il cilindro tocca l'acqua il circuito si chiude attivando un avvisatore acustico o visivo. Misurando la lunghezza del cavo calato nel tubo si trova la quota dell'acqua. Nel piezometro a tubo fisso si possono inserire trasduttori di pressione: pneumatici, a corda vibrante o a resistenza elettrica, appesi al di sotto del più basso livello piezometrico possibile. I trasduttori possono essere lasciati in sito e recuperati in occasione delle tarature periodiche, ciò consente di effettuare letture anche da postazioni lontane.

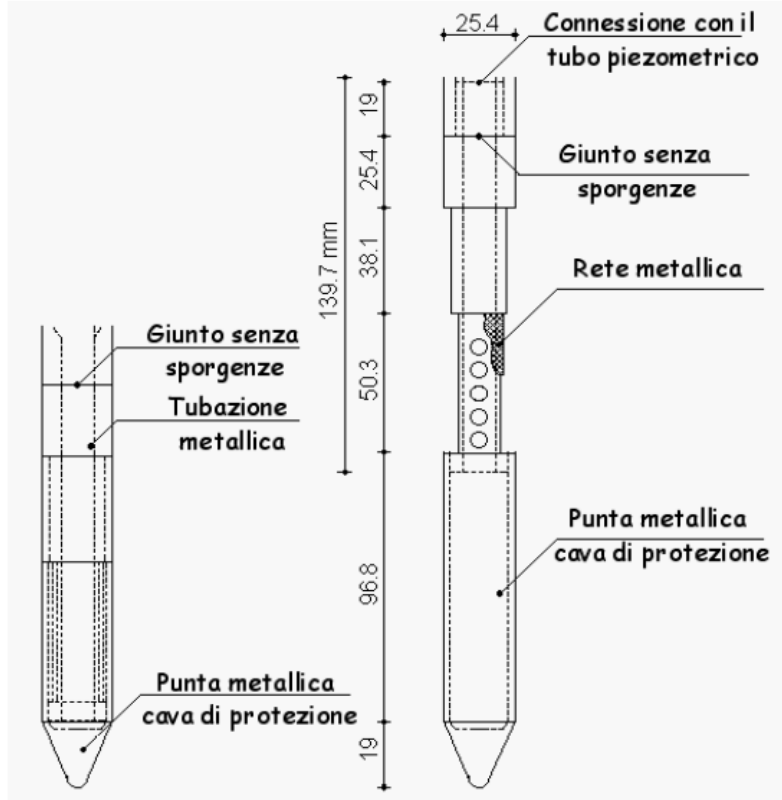


Figura 7. Piezometro a infissione

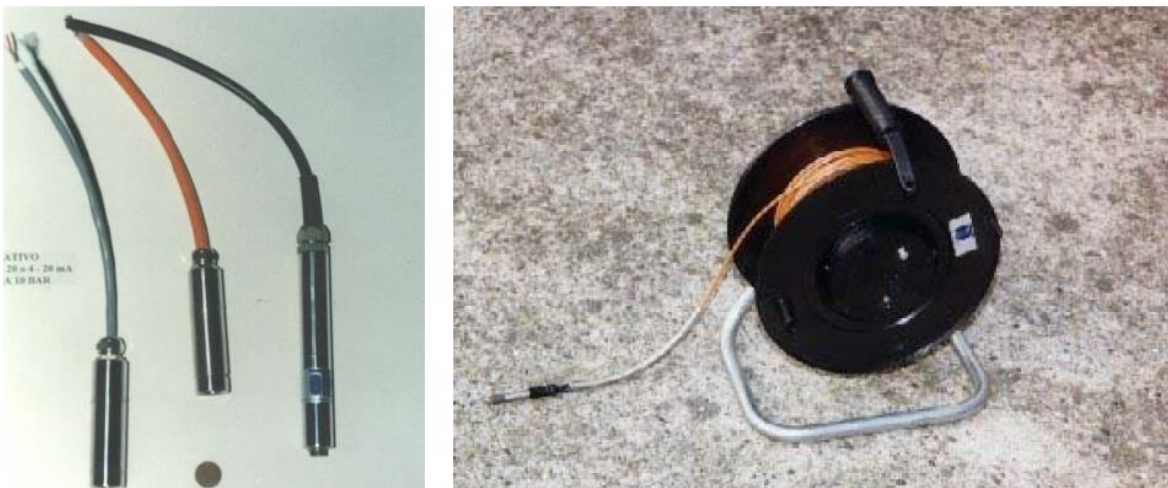


Figura 8. Sonde galvanometriche

Controllo della Tenuta dei Sigilli

Per controllare la tenuta dei sigilli si possono effettuare prove di permeabilità attraverso il piezometro, tali prove hanno però un valore limitato perché quando con esse si scopre la cattiva tenuta di un sigillo, questo è sicuramente in pessime condizioni. Il tempo di risposta di un piezometro aperto va controllato periodicamente, con prove di ritorno del livello, condotte in periodi di piezometrica esterna stazionaria. La pendenza della curva di risposta permette di valutare il grado di intasamento della punta. Lo scostamento della curva corrispondente ai valori misurati dalla retta teorica permette di valutare la presenza di bolle di gas nel terreno e nella punta o intasamenti.

Riferendosi al significato dei termini riportati in figura 9 e considerando la seguente relazione per il tempo di risposta:

$$t = T [\log(H_0 / H)]$$

dove T è un fattore di forma espresso dalla seguente relazione:

$$T = \frac{1}{30} \frac{d^2}{D \cdot K}$$

si possono ottenere curve del tipo rappresentato nel diagramma riportato in figura 9 e quindi capire se il funzionamento del piezometro è corretto.

> 2.3 Piezometro idraulico a due tubi

Detto anche piezometro idraulico chiuso, è stato progettato per poter essere installato nelle fondazioni e nel riempimento delle dighe in terra. Lo schema del funzionamento dei piezometri chiusi è visibile in figura 10. Consiste in un elemento filtrante poroso collegato a due tubi di plastica, del diametro di circa 3mm, i quali consentono l'eliminazione, attraverso la circolazione di acqua, di bolle di gas eventualmente penetrate all'interno del piezometro. Le bolle di gas tendono a radunarsi sia nell'elemento filtrante che nei tubi, creando delle discontinuità nel liquido, questo fa sì che la lettura delle pressioni non sia più realistica. I tubi di plastica sono connessi a strumenti di misura della pressione come manometri o trasduttori elettrici. L'altezza piezometrica viene determinata aggiungendo alla quota a cui è posizionato l'elemento filtrante una quantità corrispondente alla pressione registrata.

Questo strumento viene usato quasi esclusivamente per il monitoraggio a lungo termine delle pressioni interstiziali e del livello piezometrico delle dighe in terra installandolo al momento della costruzione.

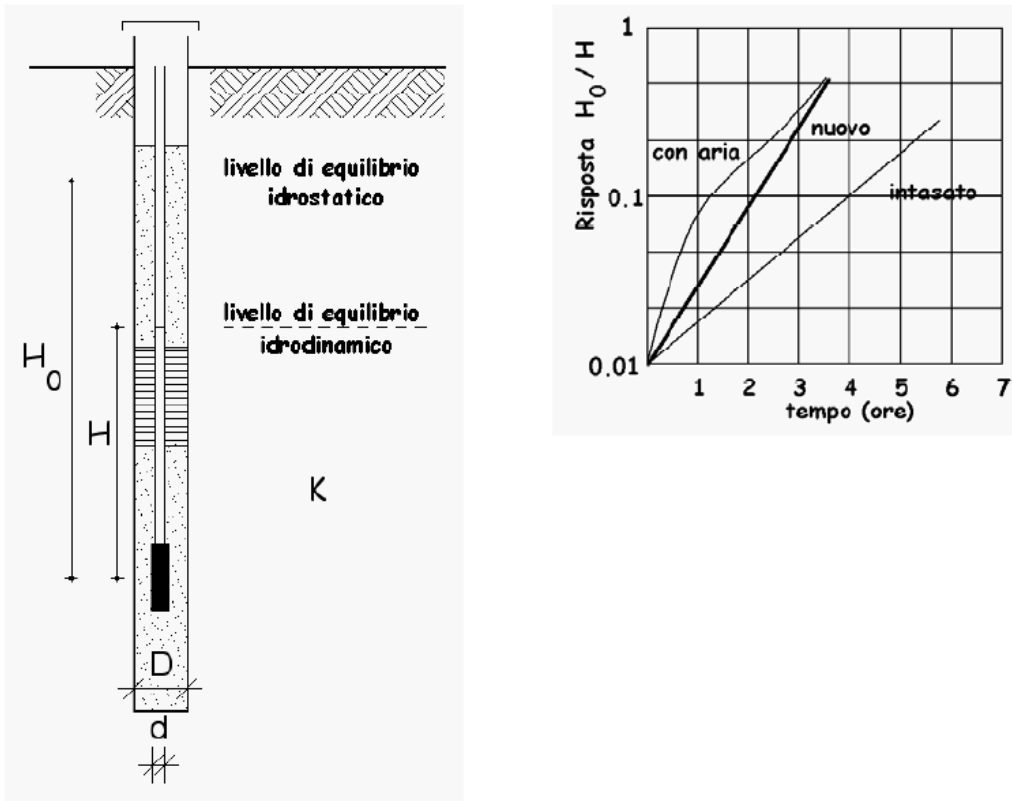


Figura 9. Schematizzazione di prove per il controllo della tenuta dei sigilli

Di piezometri idraulici a due tubi ne sono stati sviluppati due modelli principali: uno americano dall'U.S. Bureau of Reclamation (USRB), ed uno inglese detto piezometro idraulico di Bishop, i loro schemi sono mostrati nella seguente figura 11.

Modello Americano USRB & Modello Inglese di Bishop

Lo schema dei due modelli di piezometri chiusi è riportato in figura 11. Per i modelli come quello dell'USRB viene effettuato un foro cilindrico, nel sito, di

dimensioni leggermente inferiori a quelle dello strumento, e si forza il piezometro ad entrarci; si ottiene così uno stretto contatto del filtro col terreno.

I modelli con filtri conici come quello di Bishop vengono installati, nel sito preparato, inserendoli nel foro effettuato con un mandrino delle stesse dimensioni dello strumento. Occorre tener presente che durante le operazioni d'installazione sia il piezometro sia i tubi di collegamento devono essere mantenuti saturi d'acqua, e tutti gli accoppiamenti tra i tubi e il piezometro devono essere effettuati sott'acqua onde impedire l'ingresso di aria nel circuito.

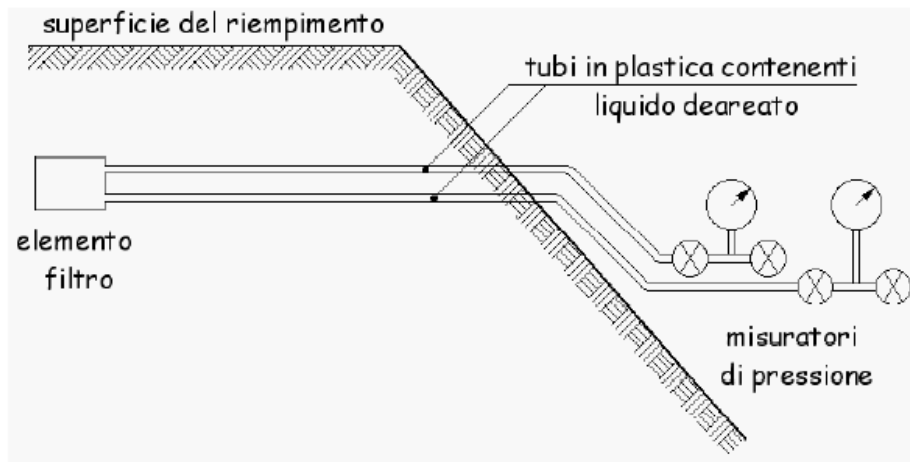


Figura 10. Piezometro idraulico a due tubi: schema del funzionamento

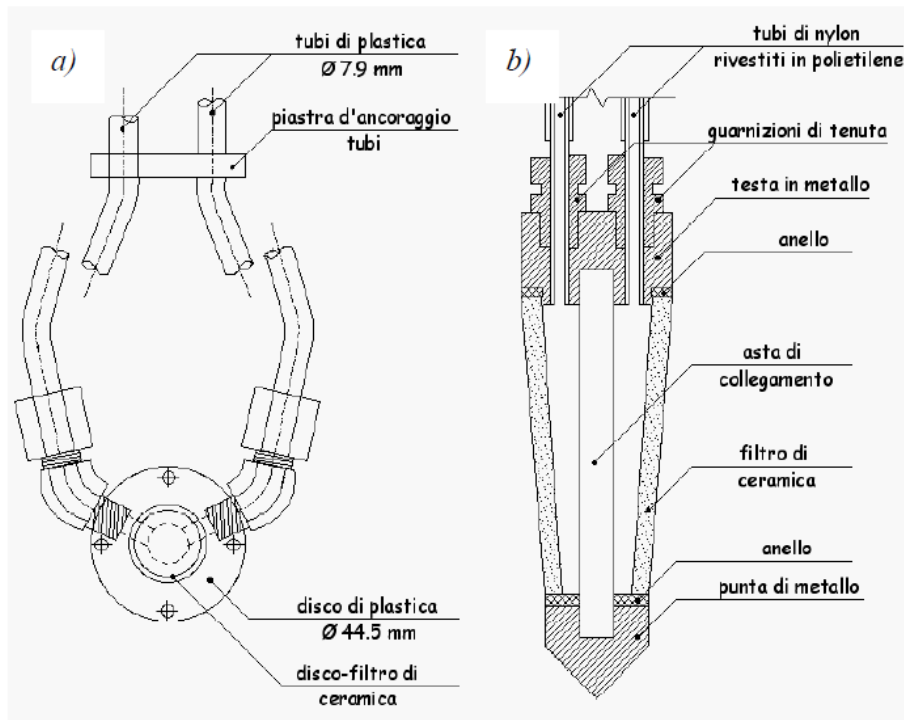


Figura 11. Piezometro idraulico a due tubi: modello americano a), modello inglese b)

Il controllo dei livelli d'acqua nei due tubi permette all'operatore di accorgersi, qualora le misure fossero tra lodo differenti in modo apprezzabile, della necessità di pulire tubi e filtro da impurità e da bolle d'aria generatesi all'interno. Il lavaggio dello strumento si esegue togliendo i due tappi di chiusura e immettendo acqua ad una pressione di 0.5bar, prima in un tubo per la durata di dieci minuti e poi nell'altro per lo stesso periodo di tempo, vedi figura 12.

I maggiori vantaggi, nell'uso del piezometro idraulico a due tubi, sono:

- non vi sono parti mobili o componenti elettriche inaccessibili, il che lo rende longevo e quindi interessante per il monitoraggio a lungo termine;
- vi è la possibilità di eliminare eventuali bolle di gas con un flusso di acqua in pressione nell'elemento filtrante;
- il modello inglese è affidabile ed ha effettuato con successo lunghe serie di registrazioni;

- la tenuta dei tubi di collegamento può essere provata dopo l'installazione con test di permeabilità;
- può essere usato per misure di permeabilità;
- sono disponibili sistemi di acquisizione dati automatici con trasduttori elettrici accoppiati al piezometro;

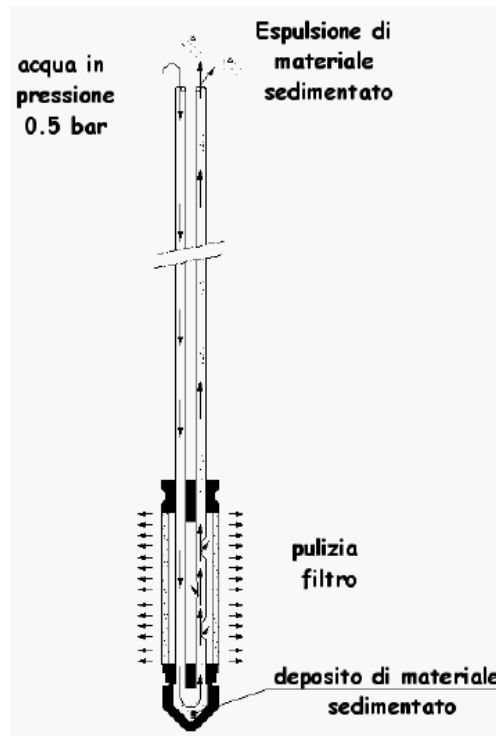


Figura 12. Pulizia del filtro in un piezometro idraulico a due tubi

I principali svantaggi sono:

- la necessità di avere una cabina chiusa per contenere l'attrezzatura di lettura e quella per effettuare l'eliminazione del gas, tale cabina deve essere protetta dal freddo per evitare il congelamento dell'acqua nei tubi;
- l'elemento filtrante deve essere posizionato preferibilmente al di sotto del livello piezometrico minimo onde evitare l'ingresso di aria nel circuito in occasione dei livelli minimi di falda;
- si devono effettuare lavaggi periodici con acqua degassata per rimuovere ogni bolla di gas che si può essere accumulata;

- le operazioni di installazione sono complesse e richiedono molta attenzione;
- la quota di lettura deve essere minore o uguale a quella a cui è posizionato il filtro.

> 2.4 Piezometri pneumatici, a corda vibrante, ed elettrici

La loro installazione è analoga a quella del piezometro a tubo fisso. La differenza, con quello a tubo fisso, sta nel fatto che, in questi, l'acqua attraversa il filtro poroso entrando in una cavità in cui agisce su una membrana, in gomma o metallo. Il principio di funzionamento di quello pneumatico, visibile in figura 13, è il seguente: inviando gas dietro la membrana, tramite un tubo, quando la pressione del gas è appena superiore a quella dell'acqua interstiziale, si produce un'estroffessione della membrana che consente al gas di entrare in un altro tubo, anch'esso collegato con la superficie; rilevando la presenza di gas in questo tubo si può misurare la pressione d'equilibrio. In alcuni modelli al posto del gas viene usato olio. Per effettuare una misura accurata della pressione occorre che lo spostamento del diaframma non sia tale da causare una variazione significativa di tale pressione.

Il limite principale di questi strumenti sta nel fatto che l'estroffessione della membrana, premuta dal gas al momento della lettura, riduce il volume disponibile per l'acqua interstiziale, la cui pressione aumenta di conseguenza. Se l'incremento della pressione del gas non è lento e graduale si possono effettuare delle letture errate della pressione interstiziale; il problema è particolarmente sentito nel caso si operi in terreni argillosi. Per ridurre l'estroffessione del diaframma gli strumenti sono stati modificati e dotati di tubo addizionale, ma il problema non è del tutto scomparso, inoltre, questa modifica produce un aumento dei tempi di risposta.

Piezometro elettropneumatico

Lo schema del piezometro elettropneumatico è riportato in figura 14. Il maggior vantaggio che si ha utilizzando questo strumento per la misurazione della pressione interstiziale è l'elevata velocità di risposta. Il cavo è costituito da quattro tubi, due pneumatici e due idraulici e da due conduttori elettrici. I due tubi idraulici permettono di effettuare la saturazione della camera idraulica e del filtro ed il suo lavaggio durante la fase d'esercizio. I tubi pneumatici ed i cavi elettrici realizzano il circuito di misura. La lettura del dato viene eseguita con l'unità di

controllo elettropneumatica. Operando sui comandi della centralina si invia gas in pressione nei tubi pneumatici contenuti nel cavo. Quando la pressione del gas raggiunge la pressione che ha il liquido (acqua olio o mercurio) trasmette al soffiutto un segnale elettrico un segnale provoca l'accensione di una spia luminosa sulla centralina. A questo punto la lettura del manometro collegato alla mandata individua il valore della pressione pneumatica equivalente.

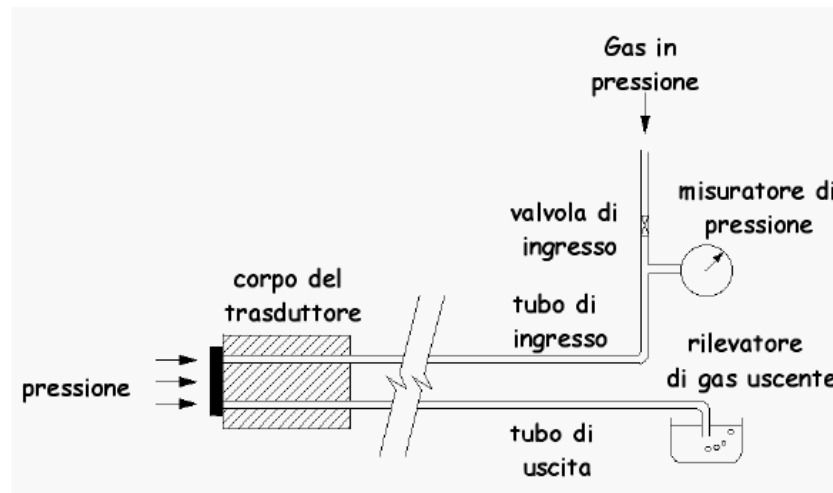


Figura 13. Schema del funzionamento del piezometro pneumatico

I maggiori vantaggi offerti dal piezometro elettropneumatico sono:

- l'indipendenza della quota di lettura da quella in cui è posizionato lo strumento;
- l'assenza di problemi di congelamento;
- la brevità dei tempi di risposta.

I principali limiti sono:

- le operazioni di lettura non sono semplici;
- le misure possono non essere accurate.

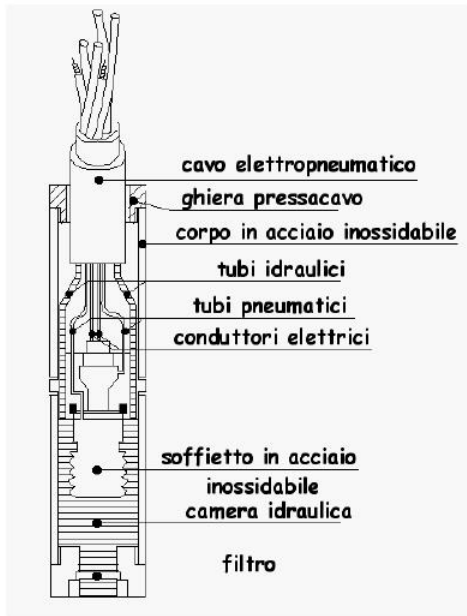


Figura 14. Piezometro elettropneumatico

Piezometro elettrico a corda vibrante

In figura 15a) è schematizzato il funzionamento di un piezometro a corda vibrante, mentre in figura 15b) è schematizzato un piezometro elettropneumatico. I piezometri elettrici a corda vibrante hanno un diaframma metallico che separa l'acqua interstiziale dal sistema di misura. Un filtro metallico tensionato è attaccato a un punto medio del diaframma, la deflessione del diaframma causa cambiamenti nella tensione del filo. Dato che la frequenza di oscillazione del filo varia con la sua tensione, pizzicando il filo nel punto medio con un elettromagnete e misurando con un'altra bobina la frequenza di oscillazione si determina la tensione nel filo e quindi la pressione interstiziale; il principio di funzionamento del trasduttore a corda vibrante è illustrato in figura. Il limite principale consiste nel fatto che la corda si può allentare in seguito a stiramenti causati dalla tensione continua o per cedimenti ai punti di aggancio, ciò comporta una variazione della frequenza di vibrazione con conseguente spostamento del punto di zero. Inoltre la corda può essere soggetta a fenomeni di corrosione. La corrosione può essere minimizzata scegliendo materiali non soggetti alla corrosione galvanica e sigillando ermeticamente la cavità intorno alla corda. Lo

spostamento del punto di zero può essere minimizzato diminuendo la tensione della corda e dei punti di ancoraggio. In alcuni modelli è possibile testare la taratura dello strumento prima della lettura. In argille compatte si possono avere errori di lettura causati dalla pressione del terreno che agisce sul corpo del piezometro, in questi casi si protegge lo strumento con un involucro metallico.

I vantaggi offerti da questo modello sono:

- la facilità di lettura;
- la brevità dei tempi di risposta;
- l'assenza di problemi di sovrappressione al momento di effettuare la misura presenti invece nel modello elettropneumatico;
- l'assenza di problemi di congelamento;
- l'indipendenza della quota di lettura da quella in cui è posizionato il piezometro;
- la possibilità di misurare le pressioni negative.

I principali limiti sono:

- i problemi di corrosione del diaframma e della corda vibrante;
- la possibile staratura dello strumento nel tempo;
- la necessità di avere una protezione dai fulmini.

Un altro tipo di piezometro a funzionamento elettrico è il piezometro elettrico a resistenza. Con il termine piezometro elettrico in genere si intende quest'ultimo tipo di piezometro.

Piezometro elettrico

Si basano sul fatto che la resistenza varia con la lunghezza, la quale a sua volta varia al variare degli sforzi a cui è sottoposto il conduttore. A seconda di come è montato il filo di cui si misura la resistenza si distinguono due tipi principali: quelli vincolati e quelli non vincolati.

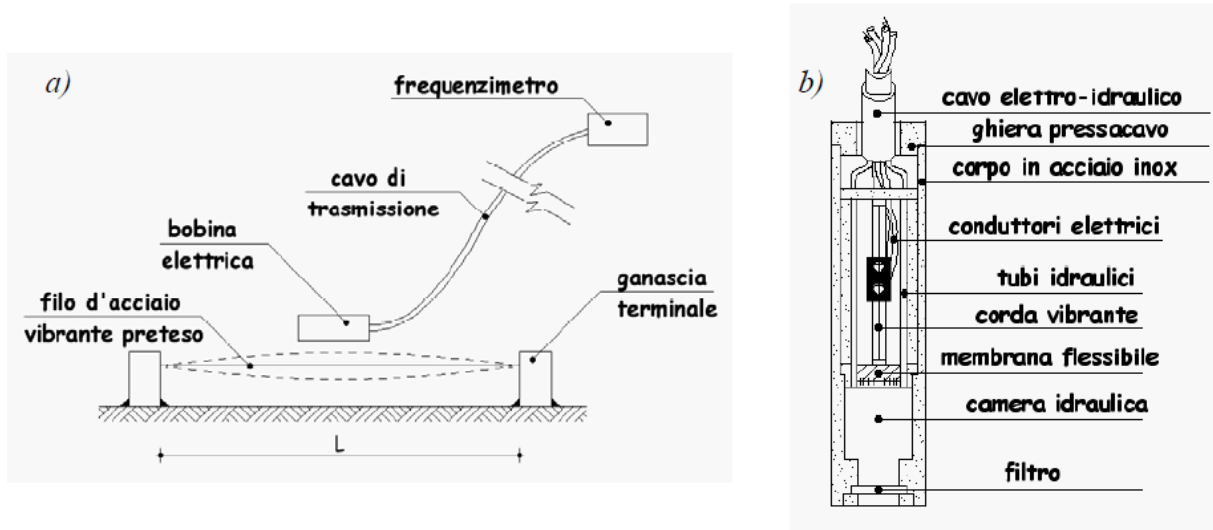


Figura 15. Piezometro elettrico a corda vibrante, schema del funzionamento a); piezometro b)

Vengono usati principalmente per le prove in sito quando vi è l'esigenza di avere strumenti di piccole dimensioni ed è possibile ritirare periodicamente lo strumento. Vengono usati, inseriti in piezometri ad infissione, anche per effettuare profili piezometrici, inserendo gradualmente lo strumento ed attendendo prima di ogni lettura che si dissipino le sovrappressioni generate dall'infissione. Quando vengono utilizzati in argille compatte, come nel caso di quelli a corda vibrante, il piezometro deve essere protetto con un robusto involucro, affinché la lettura non venga influenzata dalle pressioni totali agenti sul corpo del piezometro.

I vantaggi del piezometro elettrico sono:

- la facilità di lettura;
- la brevità dei tempi di risposta;
- l'indipendenza della quota di lettura da quella a cui è posizionato lo strumento;
- la possibilità di misurare pressioni negative;
- l'assenza di problemi di congelamento;
- alcuni modelli forniscono la temperatura di lettura.

I principali limiti sono:

- problemi di corrosione;
- errori di lettura causati dall'umidità, dalla temperatura e da possibili interferenze elettriche;
- problemi di staratura dello strumento nel tempo;
- la necessità di avere una protezione dai fulmini.

Entrambe i tipi di piezometri elettrici visti (a corda vibrante e a resistenza) possono consentire la misurazione di pressioni fino al valore massimo di circa 7Mpa. In alcuni modelli a resistenza è possibile raggiungere i 20Mpa circa.

Il diametro di questi piezometri è dell'ordine dei 25mm mentre la lunghezza è dell'ordine dei 220mm. L'alimentazione, per entrambe i modelli, viene effettuata mediante corrente continua a 12-24Volt.

> 2.5 Piezometri multipli

Questo tipo di piezometri consentono, con un unico foro di sondaggio, di effettuare la lettura della pressione interstiziale a quote diverse. Si possono avere più tipi di piezometri multipli, e possono essere sia a tubo fisso che a diaframma.

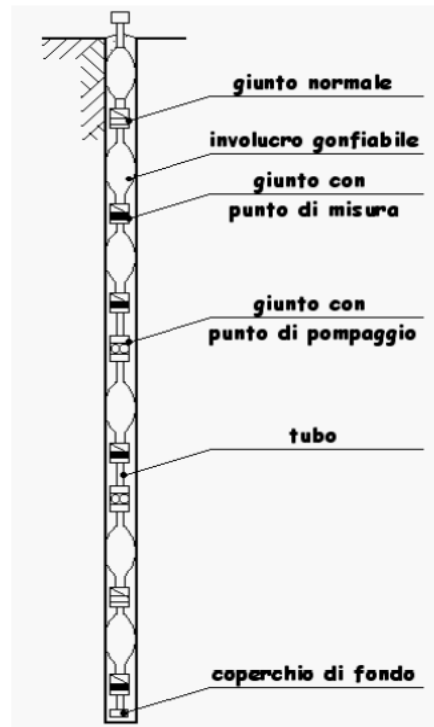


Figura 16. Schematizzazione di un piezometri multiplo

Il modello più semplice, vedi figura 16, lo si ottiene inserendo nel foro di sondaggio una serie di piezometri, in corrispondenza delle quote d'interesse, e sigillando il foro di sondaggio al di sopra e al di sotto di ciascuna di esse con degli involucri gonfiabili. Tali involucri possono essere gonfiati con aria o acqua e presentano al centro dei fori per le canalizzazioni dei piezometri e degli involucri più bassi.

Esistono anche dei tubi in PVC, a struttura modulare, che consentono di assemblare alternativamente dei moduli d'ingresso, cioè dei tratti di tubo finestrato con all'interno lo strumento di misura, con dei moduli sigillati, cioè dei

tratti di tubo che all'esterno presentano un dispositivo sigillante (costituito da sigillanti chimici che in presenza di acqua rigonfiano raggiungendo la consistenza della gomma) e all'interno hanno le canalizzazioni per gli strumenti. Esistono anche piezometri multipunto ad infissione.

> 2.6 Tempo di risposta dei piezometri

In seguito a variazioni del livello di falda si ha un flusso d'acqua tra piezometro e terreno fino al raggiungimento dell'equilibrio, che si ottiene quando il livello nel piezometro è uguale a quello di falda, il tempo necessario per il raggiungimento dell'equilibrio è detto tempo di risposta, e dipende principalmente dalla permeabilità del terreno e dalle caratteristiche geometriche del piezometro. I piezometri a tubo fisso hanno tempi di risposta molto maggiori di quelli a diaframma per il fatto che viene coinvolta in movimento una quantità d'acqua molto maggiore. Vari autori hanno presentato metodi di stima del tempo di risposta per i diversi piezometri; l'ordine di grandezza del tempo richiesto per avere il 95% della risposta di vari tipi di piezometri, installati in terreni omogenei, può essere ricavato, in funzione della permeabilità, da diagrammi come quello riportato e disponibili nella letteratura scientifica.

Teoricamente il 100% della risposta lo si ha solo dopo un tempo infinito: il 90% della risposta è considerato adeguato a fini pratici, anche se esistono tabelle, espressioni e grafici, come quello riportato in figura 17, che danno i tempi di risposta relativi al 95% della risposta.

Dalle espressioni di letteratura si nota che per avere tempi di risposta brevi occorre usare tubi fissi di piccolo diametro e zone di filtro sabbioso di grandi dimensioni.

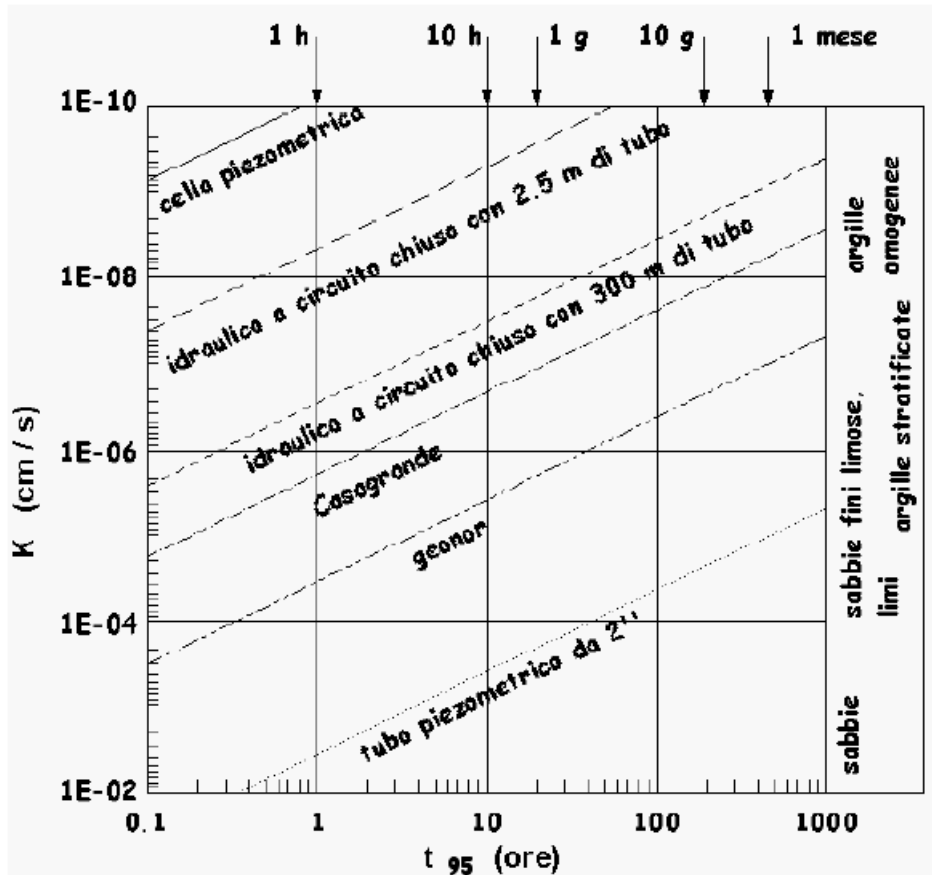


Figura 17. Tempi di risposta dei vari tipi piezometri

L'importanza della durata del tempo di risposta dipende dallo scopo per cui si effettuano le misure: se, ad es., si vuole determinare la pressione dell'acqua interstiziale in un terreno in cui le fluttuazioni di pressione non sono significative un piezometro a tubo fisso può andar bene, se invece la pressione di falda è soggetta a variazioni giornaliere, e la conoscenza del livello di falda è critica, si deve usare uno strumento con tempo di risposta molto breve. Per abbreviare i tempi di risposta e ridurre la possibilità di intasamenti, in seguito a ripetuti flussi d'acqua in ingresso e uscita attraverso il filtro poroso, si può inserire un trasduttore di pressione, e sigillare il tubo fisso sopra di esso con un involucro gonfiabile. Ciò consente, ancora, di recuperare il trasduttore per ritrarlo.

In terreni non saturi o gassosi, il diametro interno del tubo fisso deve essere maggiore di 8mm, altrimenti l'eventuale gas penetrato nel tubo fisso attraverso l'elemento poroso può formare bolle che non riescono a raggiungere il pelo libero dell'acqua. Questo produce un innalzamento del livello dell'acqua nel tubo fisso che non corrisponde più alla quota piezometrica.

In terreni consolidati il tubo fisso può torcersi o tagliarsi creando una falla o ostruendo il passaggio della sonda di misura. In questi casi o si installa intorno al tubo fisso un altro tubo, o si usa un altro tipo di piezometro. Nel caso si usi un tubo di rivestimento per prevenire infiltrazioni d'acqua nell'intercapedine tra i tubi si riempie l'intercapedine con fanghi bentonitici.

Se il livello piezometrico risale sopra la quota di congelamento, l'acqua nel tubo fisso ghiaccerà rendendo inoperabile il piezometro. Il problema viene risolto sostituendo la parte superiore di acqua nel tubo fisso con miscele anticongelanti aventi peso specifico minore di uno. Tali miscele non devono danneggiare il tubo fisso, inoltre si dovrà ricalcolare la pressione dell'acqua tenendo conto della colonna di liquido anticongelante. Da tenere presente che se la miscela si comporta da isolante elettrico, la sonda galvanometrica non è più utilizzabile e si dovranno usare altre tecniche di misura.

3. CELLE DI PRESSIONE

Le celle di pressione sono utilizzate per determinare la distribuzione, l'intensità e la direzione delle pressioni totali. Il loro impiego rientra principalmente in due tipi di applicazioni:

- misure all'interno di una massa di terreno, come nel riempimento di una diga o nel terreno sovrastante un tunnel;
- misure all'interfaccia di un elemento strutturale, come muri di sostegno, tunnel, pilastri o al di sotto di fondazioni superficiali.

Oltre ai modelli trattati in questa sede vi sono celle di pressione di forma toroidale. La cella di carico toroidale trova applicazione nel controllo della tesatura di tiranti o di bulloni per chiodature in roccia o nel terreno; serve inoltre per tenere sotto controllo gli stessi durante il servizio evidenziando eventuali rilasci o sovraccarichi tensionali. Alcune celle di pressione comuni sono riportate in figura 18.



Figura 18. Celle di pressione

> 3.1 Celle di pressione all'interno di un terreno

I motivi principali dell'uso di celle di pressione nei terreni sono: la convalida delle assunzioni di progetto, e la determinazione di informazioni per il miglioramento dei progetti futuri; secondariamente vengono impiegate per il controllo delle costruzioni e per altri motivi. Ci sono due tipi fondamentali di celle di pressione per i terreni: quelle a diaframma e quelle idrauliche; i loro schemi sono visibili in figura 19.

Nei modelli a diaframma, una membrana circolare rigida viene inflessa dalla pressione esterna del terreno, la deflessione viene rilevata da un trasduttore a resistenza elettrica collegato direttamente alla superficie interna della cella o per mezzo di un trasduttore a corda vibrante. Le celle a diaframma possono avere una o due superfici attive indipendenti, nel secondo caso, le due misure indipendenti forniscono un importante controllo sulla bontà dell'installazione, in

particolare se entrambe le facce hanno un contatto analogo con il terreno circostante.

Il modello idraulico è costituito da due piatti d'acciaio circolari o rettangolari saldati insieme lungo il perimetro, di dimensioni analoghe a quelle del modello a diaframma, talvolta viene scavato a macchina un solco lungo il bordo per aumentare la flessibilità della superficie attiva, così che tenda a lavorare come un pistone. La cavità interna è riempita con un liquido e connessa, tramite un tubo d'acciaio, con un trasduttore di pressione. È importante che la cella sia riempita con un liquido degassato e che non rimangano intrappolate all'interno bolle di gas durante il riempimento. Le pressioni totali che agiscono sull'esterno della cella vengono bilanciate da un'eguale pressione indotta nel liquido interno. Lo spessore riempito dal liquido interno può variare da 2.5 a 10mm; uno strato di liquido più sottile, 2.5-6mm, comporta una maggiore rigidità della cella e una più stretta connessione della cella con il terreno circostante in quanto le superfici della cella non hanno una convessità accentuata, inoltre gli effetti dovuti alla concentrazione e alla dilatazione termica sono minimi.

I trasduttori di pressione per i modelli idraulici sono gli stessi dei piezometri a diaframma: pneumatici, a corda vibrante o a resistenza elettrica, con i vantaggi ed i limiti visti.

La misura della pressione totale in un punto all'interno del terreno richiede:

1. che la cella non alteri apprezzabilmente lo stato di tensioni all'interno del terreno a causa della sua presenza,
2. un'area d'indagine sufficientemente estesa da mediare le discontinuità locali,
3. una minima sensibilità della cella alle stratificazioni non uniformi,
4. un metodo d'installazione che non modifichi sensibilmente lo stato tensionale.

Quest'ultimo punto fa sì che le misure siano generalmente limitate ai riempimenti o ad altri terreni artificiali; la procedura d'installazione consiste nel compattare il riempimento con attrezzature pesanti, scavare una trincea, inserirvi la cella e riempire intorno e sopra di essa compattando a mano o con macchine leggere. Per non avere carichi puntuali sulla superficie della cella occorre che la dimensione dei granuli di terreno sia piccola rispetto al diametro della cella.

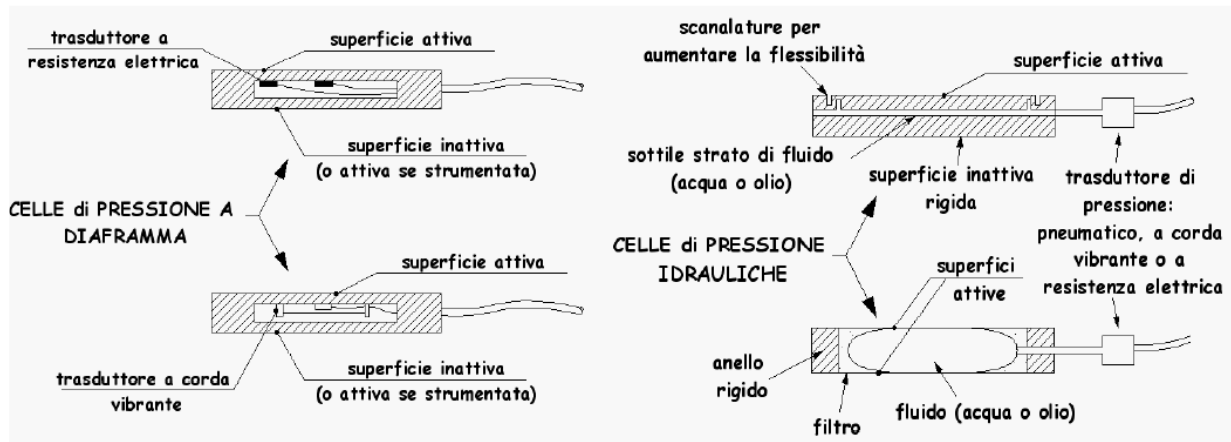


Figura 19. Schemi del funzionamento di celle di pressione a diaframma e idrauliche

Le celle di pressione sono state usate con successo anche per misurare le tensioni orizzontali in terreni soffici naturali, mentre l'inserimento delle celle in fori di sondaggio, successivamente riempiti, fornisce generalmente misure soggette a grandi errori dovuti all'alterazione dello stato di tensioni interno al terreno.

Molte celle sono progettate per misurare o pressioni statiche o pressioni che variano lentamente, se vengono utilizzate per studi dinamici a larga scala o per studi sismici, in cui si richiedono tempi di risposta brevi, si deve fare attenzione che i loro tempi di risposta siano sufficientemente rapidi.

Le misure delle pressioni totali sono affette da errori perché sia la presenza della cella sia il metodo d'installazione creano, generalmente, cambiamenti significativi nel campo delle pressioni. Per avere misure rappresentative dello stato tensionale del terreno occorre far corrispondere il modulo elastico della cella a quello del terreno indagato, tarando la cella in laboratorio, questa operazione è difficile e costosa; inoltre è molto difficile posizionare la cella in modo che il materiale intorno ad essa abbia lo stesso modulo elastico e densità del terreno circostante, ed in modo che abbia entrambe le facce in stretto contatto col materiale.

Il diametro tipico delle celle varia da 230 a 300mm, si è trovato che celle di dimensioni minori sono soggette a errori maggiori dovuti sia agli effetti di scala che a problemi di messa in opera; celle di dimensioni maggiori, 1.0-1.2m di diametro, sebbene forniscano valori più accurati delle tensioni in quanto mediati su una superficie più ampia, presentano, per le loro dimensioni, problemi

d'installazione ed è comunque molto difficile creare una stratificazione uniforme su un'area così estesa.

In conclusione si vede che i problemi che affliggono le misure nei terreni sono molti ed influenti, per questo è generalmente impossibile misurare la pressione totale con grande accuratezza.

> 3.2 Celle di pressione all'interfaccia di un elemento strutturale

È possibile effettuare le misure delle tensioni totali all'interfaccia di una struttura con grande accuratezza, infatti tali misure non sono affette da tante cause d'errore come quelle delle tensioni nel terreno. Per questo tipo di misure si possono utilizzare anche le stesse celle usate nei terreni con due eccezioni. Primo, una cella idraulica con una superficie attiva sottile non è utilizzabile in quanto a causa della sua convessità, non è possibile installarla in modo che tale superficie sia assolutamente in piano con quella della struttura, la sua rigidità è troppo bassa, ed è anche piuttosto sensibile alle variazioni di temperatura che spesso avvengono nei punti di messa in opera. Secondo, una cella a diaframma con una sola superficie attiva non è adatta perché le misure sulla superficie esterna sono soggette a errori significativi causati dal carico disuguale. Si può usare una cella a due facce dando maggior credito alle misure fatte dalla superficie interna. Usando una cella idraulica, c'è la possibilità, quando la temperatura sale durante la solidificazione del cls, che la cella si dilati formando una superficie di contatto concava, così quando la temperatura scende cella e struttura non sono più in contatto. Per questo è preferibile costruire una cella idraulica con una superficie attiva, quella esterna, e con la superficie da porre in contatto con la struttura in acciaio dello spessore di circa 13mm, in modo che l'espansione avvenga verso l'esterno, lo strato di liquido all'interno della cella, inoltre, deve essere il più sottile possibile per ridurre gli effetti della temperatura. Si deve tener presente che, anche le irregolarità della superficie della struttura sono fonte di errori di misura.

Esistono vari metodi d'installare una cella alla superficie di contatto tra cls e terreno, un metodo di validità generale per muri di sostegno, tunnel e pilastri, consiste nell'attaccare la cella alla cassaforma nel punto in cui dovrà aderire alla struttura prima del getto. Il requisito principale dell'installazione è che la superficie attiva della cella e quella della struttura siano assolutamente in piano.

Tale requisito è essenziale anche nel caso di celle montate all'interfaccia tra terreno e strutture in acciaio.

Per l'installazione di una cella all'interfaccia tra roccia e struttura ci sono più approcci. Qualora la superficie della roccia sia piuttosto regolare e la roccia sia dura, si sceglie un punto in cui la superficie non abbia discontinuità superiori a circa 10mm, rimuovendo eventuali frammenti di alterazione. Si applica uno strato di malta o resina epossidica sulla superficie rocciosa e ci si preme contro la cella, facendo fuoriuscire la malta o la resina finché non rimane uno strato di circa 5-10mm tra cella e roccia. Si deve evitare che bolle d'aria rimangano intrappolate, e può essere necessario trattenere la cella in posizione vincolandola a chiodi fissi nella roccia. Se la roccia è tenera si può creare una cavità nella roccia e installarvi la cella con la superficie attiva rivolta verso l'esterno in piano con la superficie della roccia.

Installando una cella all'interfaccia tra roccia e calcestruzzo si possono utilizzare i metodi suddetti facendo attenzione ai problemi di disaccoppiamento tra cella e calcestruzzo quando, durante la presa di quest'ultimo, la temperatura sale e scende.

Alcune celle di pressione impiegate all'interfaccia tra terreno ed elementi strutturali sono riportate nella seguente figura 20.

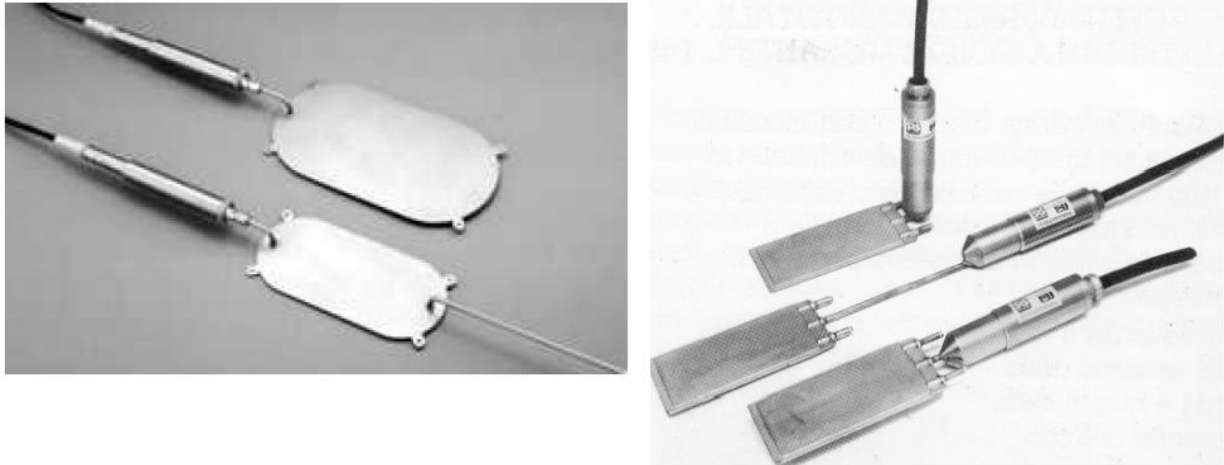


Figura 20. Celle di pressione impiegate all'interfaccia con elementi strutturali

> 3.3 Celle di pressione elettriche a corda vibrante

Lo schema tipico di una cella di pressione a corda vibrante è riportato in figura 21. Il trasduttore consta di una corda metallica, vincolata ad un diaframma deformabile in acciaio inox, che nel momento della misura viene eccitata da un elettromagnete a vibrare secondo la frequenza propria di risonanza. La frequenza è funzione della tensione della corda e quindi della pressione dell'olio agente sul diaframma. La misura si effettua con l'unità di lettura elettronica, la quale riceve il segnale di frequenza in uscita e lo visualizza su un display digitale. Questo apparecchio consente la misurazione di pressioni fino a 50 bar.

> 3.4 Cella di pressione elettropneumatica

Possono avere sensore complanare o perpendicolare al trasduttore di pressione. La cella di pressione con sensore complanare al trasduttore, per la sua configurazione è adatta ad essere installata in rilevato per la misura delle pressioni verticali. La cella di pressione elettropneumatica con trasduttore perpendicolare per la sua configurazione è particolarmente indicato per essere installato al contatto tra terreno ed elementi strutturali. Il suo funzionamento è sostanzialmente uguale a quello delle celle di pressione impiegate per il rilevamento delle pressioni totali verticali in rilevati.

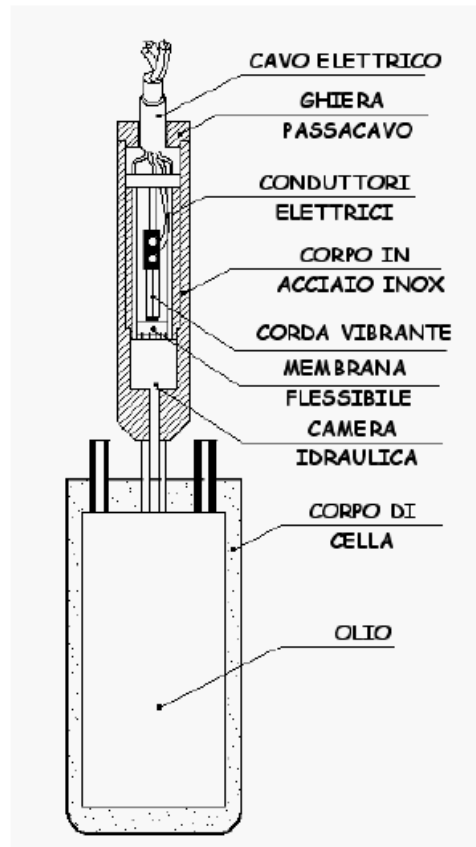


Figura 21. Cella di pressione elettrica a corde vibrante

Entrambe le celle di pressione elettropneumatiche sono costituite da:

1. Sensore rettangolare sottile, costituito da due membrane in acciaio inox saldate al contorno, contenute olio speciale. La pressione dell'olio è pari a quella che agisce all'esterno sulle membrane.
2. Un trasduttore elettropneumatico distanziato dal sensore, a contatto con il fluido in pressione.
3. Un cavo elettropneumatico costituito da due tubi pneumatici e due conduttori elettrici, che collega lo strumento all'unità di lettura.

La pressione esercitata dal fluido sul soffiello in acciaio del trasduttore viene equilibrata da una pressione pneumatica ottenuta inviando dalla centralina il gas. L'equilibrio è segnalato all'esterno dall'accensione di una spia luminosa.

4. ASSESTIMETRI

Gli assestimetri sono utilizzati per il monitoraggio delle variazioni di distanza tra due o più punti lungo un asse verticale comune; mediante tali strumenti si può ricavare, oltre che gli assestamenti del terreno, il valore delle tensioni qualora siano note le proprietà meccaniche del mezzo.

Per l'installazione degli assestimetri, generalmente occorrerà predisporre un foro appositamente rivestito per tutta la sua lunghezza con tubazione di manovra, del diametro compreso tra 130 e 150 mm. L'assestimetro più comunemente impiegato consiste in una serie di punti magnetizzati ad alette sporgenti, ancorati a diverse quote nel terreno di cui si vuole seguire l'assestamento e calzati attorno ad una colonna verticale.

> 4.1 Assestimetri a piastra

Sono utilizzati per il monitoraggio degli assestamenti al di sotto di rilevati su terreni soffici. L'assestimetro a piastra, riportato in figura 22, è costituito da una piastra d'acciaio, legno o cls ($1.0-1.2 \text{ m}^2$ di superficie) posizionata alla base del rilevato, a cui è attaccato un tubo verticale in ferro la cui sommità fuoriesce dal rilevato (circa 50mm di diametro).

Misure ottiche di livellazione della sommità del tubo forniscono la quota della piastra. Se il rilevato ha altezza superiore ad 8m o la piastra è appoggiata su terreno altamente compressibile si utilizza un tubo di rivestimento, scollegato dalla piastra, intorno a quello su cui si effettuano le misure, per impedire che la spinta verso il basso trasmessa dal terreno al palo per attrito negativo spinga la piastra al di sotto del livello a cui è stata posizionata. La piastra viene posizionata all'inizio della costruzione del rilevato, e man mano che viene aggiunto il materiale di riempimento si devono aggiungere gli elementi del tubo di misura. A questo proposito si deve fare molta attenzione che il tubo sia mantenuto in verticale e si devono misurare con precisione la lunghezza dei vari elementi, per conoscere la lunghezza complessiva con precisione.

Il vantaggio principale di questo strumento sta nella sua semplicità. I limiti, nel fatto che può essere danneggiato dalle attrezzature di cantiere, nella difficoltà di compattare il terreno di riempimento intorno al tubo, nella possibilità di errori di misura dovuti a errore nella misura della lunghezza del tubo o nel fatto che non è

verticale. Se installato con accuratezza questo strumento può fornire dati con un intervallo di precisione di $\pm 3-25\text{mm}$.

> **4.2 Assestimetro fisso in foro di sondaggio**

Questo tipo di assestimetro, visibile in figura 23, è impiegato per il monitoraggio delle variazioni di distanza tra 2 o più punti del terreno lungo l'asse del sondaggio. Si possono realizzare, in un unico sondaggio, più punti di ancoraggio a quote diverse, ciascuno con un'asta d'acciaio che va dal punto di ancoraggio all'anello fisso in superficie. Realizzando quindi un assestimetro multiplo. Al posto delle aste possono essere impiegati fili metallici in tensione.

Le aste hanno un diametro variabile, 5-13mm, sono di più semplice installazione e vengono preferite per assestimetri fino a 90m di lunghezza. Le aste sono in acciaio inossidabile, in lega d'alluminio o fibra di vetro (particolarmente adatte qualora si operi in aree interessate da alte temperature, come campi geotermici, che possono modificare sensibilmente la lunghezza dell'asta); e vengono messe in opera inserite entro un tubo di rivestimento, talvolta riempito con olio, per ridurre gli attriti (soprattutto nel caso in cui il sondaggio non sia verticale). L'asta è connessa, in corrispondenza dell'anello fisso, ad un trasduttore ad esempio a potenziometro lineare: le variazioni di lunghezza dell'asta producono variazione della resistenza del potenziometro e vengono così rilevate. Per lunghezze superiori a 90m, è preferibile utilizzare fili d'acciaio inossidabile prestirati in modo che la loro lunghezza non vari sensibilmente per stiramento quando sono posti in opera).

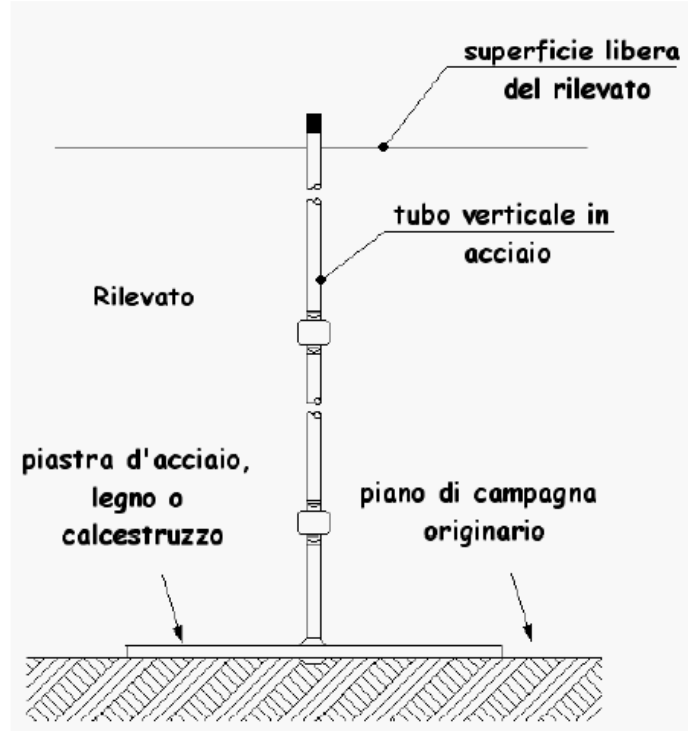


Figura 22. Schema del funzionamento di un assestometro a piastra

I fili metallici possono essere messi in tensione al momento dell'installazione fissandoli all'anello superficiale, eventuali variazioni della distanza tra i punti di attacco produrranno variazioni della tensione dei fili che possono essere rilevate con trasduttori meccanici (micrometri), a resistenza elettrica, a corda vibrante ed altri.

> 4.3 Assestimetri con fili metallici a tensione costante

Un altro metodo di misura consiste nel mantenere i fili ad una tensione costante mediante un sistema di pesi e pulegge; in questo caso si misura l'accorciamento (o anche l'allungamento nel caso si misurino tensioni) del filo tra il punto di ancoraggio e la puleggia vedi figura 24.

L'ancoraggio sia delle aste che dei fili metallici all'interno del sondaggio può essere realizzato in vari modi, a seconda del tipo di roccia o terreno, del diametro e della lunghezza del sondaggio. Per l'ancoraggio di aste in roccia sono molto

usati ancoraggi con espansore meccanico cuneiforme. Gli ancoraggi in cemento non sono adatti per il terreno ma solo per la roccia, sono utilizzati sia per le aste che per i fili metallici che vengono protetti dal cemento con tubi di rivestimento. Esistono due tipi di ancoraggi idraulici utilizzati sia per le aste che per i fili metallici. Il modello a tubo di espansione è utilizzabile sia nei terreni che nella roccia; è costituito da un tubo metallico morbido sigillato ad una estremità e saldato all'altra col supporto per l'asta o il filo. Il tubo viene pressurizzato con olio fino a farlo aderire con le pareti del sondaggio. Il secondo tipo detto a denti è utilizzato principalmente nei terreni. Il dispositivo viene calato alla quota di fissaggio, uno o due gruppi di denti metallici, spinti idraulicamente verso l'esterno, si infingono nelle pareti del sondaggio ottenendone l'ancoraggio.

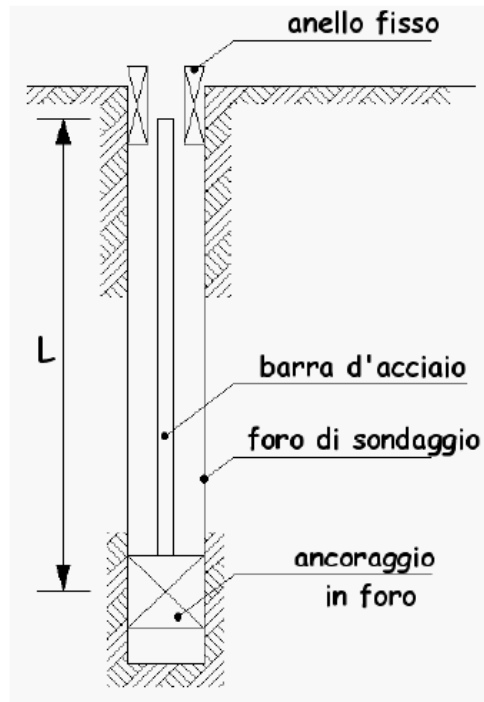


Figura 23. Schema del funzionamento di un assestimetro fisso in foro di sondaggio

> 4.4 Assestimetro a sonda

Consentono di misurare le variazioni di distanza tra due o più punti di un asse, e quindi gli assestamenti, per mezzo di una sonda calata nel foro di sondaggio. Questi dispositivi sono alternativi a quelli visti nel paragrafo precedente, essi hanno il vantaggio di consentire misure tra una qualunque coppia di punti della verticale; sono meno costosi ma hanno lo svantaggio di fornire, generalmente, misure meno precise dei precedenti. Questo tipo di strumento può essere realizzato, ad esempio, inserendo in un sondaggio una serie di spezzoni di tubo inclinometrico di sezione alternativamente più grande e più piccola. I tubi inclinometrici hanno sezione circolare, ma presentano delle scanalature simmetriche, disposte a 90° l'una dall'altra, che fanno da guida per la sonda di misura; i tubi possono essere in plastica o in metallo. Facendo attenzione che gli elementi di sezione minore si inseriscano, per un breve tratto, all'interno di quelli a sezione maggiore, si realizza un accoppiamento telescopico tra i vari elementi che permette loro di muoversi seguendo i movimenti del terreno. Dato che la trasmissione del movimento dal terreno ai tubi è affidata esclusivamente all'attrito del terreno sulla loro superficie esterna, e non a sistemi di ancoraggio al terreno, se il terreno scivola, anche parzialmente, intorno ai tubi, le misure degli spostamenti possono non essere corrette.

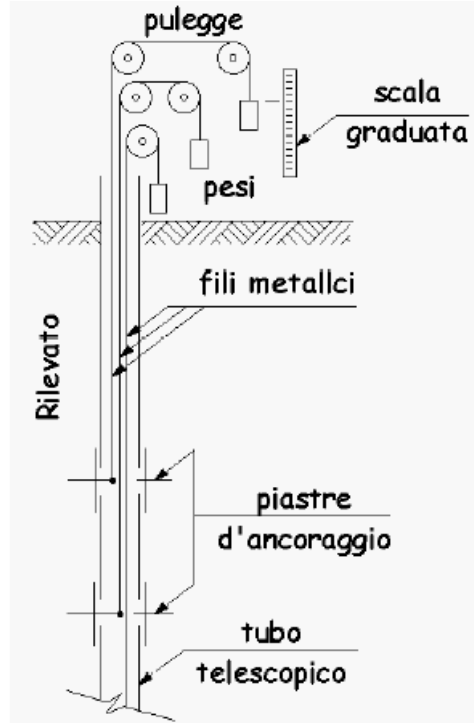


Figura 24. Schema del funzionamento degli assestimetri con fili metallici a tensione costante

La profondità del bordo inferiore dei tubi di sezione minore viene misurata utilizzando una sonda calata nel tubo. La sonda presenta una coppia di alette metalliche, a molla, che possono rientrare nel corpo dello strumento. Dopo che la sonda è scesa al di sotto di un tubo a sezione minore, viene fatta risalire finché le alette non fanno presa sul bordo del tubo, e a questo punto si misura di quanto la sonda è stata calata. Quando la sonda arriva in fondo al tubo, le alette vengono ritirate e lo strumento può essere recuperato.

Un'altra tipologia di strumenti sono quelli che utilizzano una sonda con trasduttore a bobina di induzione elettromagnetica collegata via cavo con la superficie.

La parte interrata dell'attrezzatura è costituita da un tubo in plastica, che abbia la possibilità di estendersi o accorciarsi seguendo i movimenti del terreno, o per la presenza di attacchi telescopici tra gli elementi che lo costituiscono o perché

dotato di elasticità intrinseca come nel caso del tubo corrugato. Il tubo ha un diametro dell'ordine dei 60-100mm, ed è circondato da anelli o placche d'acciaio in corrispondenza dei punti di misura. Nel tubo corrugato esterno, che segue i movimenti del terreno, viene inserito un tubo in plastica di diametro minore per facilitare il passaggio della sonda e per irrigidire il tubo corrugato che, essendo più debole, potrebbe rompersi.

Quando la sonda calata nel tubo giunge in corrispondenza di un anello o di una placca, si ha un massimo della corrente indotta nella bobina che viene rilevato strumentalmente in superficie, a questo punto, per mezzo di una fettuccia metrica collegata alla sonda, se ne effettua la misura della profondità. Dalle variazioni della profondità degli anelli o delle placche nel tempo si ricava l'entità degli assestamenti.



Figura 25. Sonda e anelli impiegati in un assestimetro a sonda

Per effettuare l'installazione si procede all'esecuzione di un sondaggio con un tubo di rivestimento, e lo si lava con acqua pulita. Il tubo viene inserito nel sondaggio dopo aver assemblato gli elementi di tubo corrugato con all'interno il tubo rigido (lungo 3m), e posizionando gli anelli metallici sul tubo corrugato alle quote previste. Gli elementi di tubo vengono uniti con mastice o nastro sigillante, l'intercapedine tra i due tubi viene riempita con fango bentonitico per diminuire l'attrito tra di loro. Terminato l'inserimento del tubo nel sondaggio, si realizza la connessione del movimento del tubo corrugato con quello del terreno, inserendo,

nell'intercapedine tra il tubo e le pareti del sondaggio, della malta. La miscela della malta deve avere un modulo elastico il più vicino possibile a quello del terreno circostante, altrimenti non è detto che si abbia la connessione tra i movimenti del terreno e quelli del tubo. Una volta inserita la malta viene ritirato il tubo di rivestimento del sondaggio.

5. INCLINOMETRI

Gli inclinometri sono strumenti per il monitoraggio delle deformazioni ortogonali all'asse di un tubo per mezzo di una sonda che scorre nel tubo stesso. La sonda contiene un trasduttore che misura l'inclinazione del tubo rispetto alla verticale. I tubi inclinometrici possono essere installati sia in sondaggio che all'interno di materiale di riempimento, le loro applicazioni tipiche sono:

- La determinazione della superficie di scivolamento di una frana;
- Il monitoraggio dei movimenti orizzontali di dighe in terra, rilevati su terreni soffici e lungo il bordo di scavi o tunnel;
- Il monitoraggio delle deviazioni dalla verticale di paratie, pali di fondazione o muri di sostegno.

Gli strumenti inclinometrici sono costituiti da un tubo, installato permanentemente, generalmente in plastica o lega d'alluminio, la cui sezione non è esattamente circolare, ma presenta delle scanalature simmetriche, disposte a 90° l'una dall'altra, che guidano la sonda. Lo schema di funzionamento degli inclinometri è riportato in figura 26.

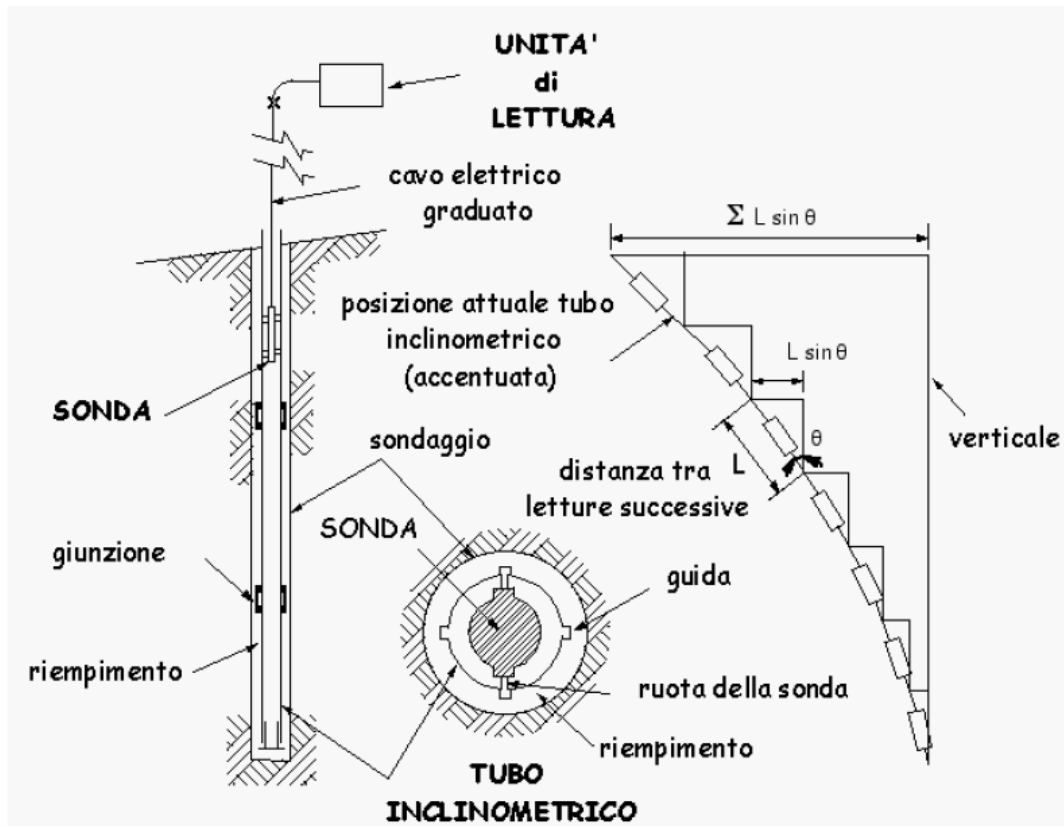


Figura 26. Schema del funzionamento degli inclinometri

> 5.1 Tubi inclinometrici

Generalmente sono in plastica o lega d'alluminio, la sezione non è esattamente circolare, ma presenta delle scanalature simmetriche, disposte a 90° l'una dall'altra, che guidano la sonda.

Il loro diametro varia da 50 a 90mm circa a seconda del materiale, quelli in alluminio possono essere soggetti a corrosione, per limitarne gli effetti i tubi vengono verniciati internamente ed esternamente, qualora l'ambiente di messa in opera sia particolarmente corrosivo, o si richieda una lunga durata di esercizio è preferibile usare tubi in plastica. I tubi in alluminio sono preferibili qualora si effettuino installazioni molto profonde, in quanto quelli in plastica possono essere danneggiati dalla pressione del materiale di riempimento dell'intercapedine tra

tubo e sondaggio o da tensioni assiali durante l'installazione. I tubi in plastica hanno generalmente un sistema di accoppiamento ad incastro che allinea le scanalature automaticamente, quelli in metallo possono essere accoppiati allineando le scanalature dei tubi e fasciando il punto di giunzione con un tratto di tubo avente lo stesso profilo ma di diametro leggermente maggiore, che viene fissato ai tubi sottostanti mediante rivetti. I tubi in plastica possono essere accoppiati sigillando perfettamente la giuntura con collanti, ciò li rende preferibili quando si effettui il riempimento con malta, piuttosto che con materiale terrigeno, in quanto la malta penetra più facilmente nel tubo dalle possibili fessure presenti nel punto di giuntura.

Talvolta, per minimizzare i costi, vengono usati tubi in acciaio a sezione quadrata con sonde aventi ruote adatte a scorrere negli angoli del tubo, i dati che si ottengono sono molto meno precisi di quelli ottenuti con altri tipi di tubo. I sondaggi per l'installazione dei tubi inclinometrici dovrebbero scendere 3-6m al disotto della presunta quota della zona di deformazione attiva, ed essere quanto più possibile verticali. Se si vogliono calcolare le deformazioni assolute, occorre fissare la base del tubo in modo che non sia interessata dal movimento, per questo il sondaggio deve scendere fino ad incontrare un livello che possa considerare fisso rispetto alla parte soprastante a cui ancorare la base del tubo. Quando vi è il rischio di un collasso delle pareti del sondaggio durante l'installazione, si deve utilizzare un tubo di rivestimento per il sondaggio che viene ritirato via via che si procede al riempimento dell'intercapedine tra tubo inclinometrico e pareti del sondaggio. Tale riempimento deve essere eseguito con malta sabbia o ghiaietto, quello con malta è più adatto di quelli granulari ma non può essere utilizzato qualora la malta tenda a disperdersi nel terreno circostante. Quando viene inserita la malta, prima che questa solidifichi, si deve fare attenzione che il tubo inclinometrico non tenda e risalire per la spinta di Archimede o che non assuma curvature indesiderate.

> 5.2 Sonda inclinometrica

Vi è poi una sonda portatile contenente un trasduttore di inclinazione, collegata con un cavo elettrico graduato, ad un'unità di lettura, anch'essa portatile. Come si vede nella fotografia, la sonda è munita di ruote, che devono essere inserite in una coppia di scanalature del tubo affinché rimanga parallela al tratto di tubo che sta attraversando ed effettui le misure in un piano ben definito.

Effettuando due serie di misure, nei due piani ortogonali individuati dalle due coppie di scanalature, si possono determinare le componenti del movimento orizzontale di una qualunque sezione.

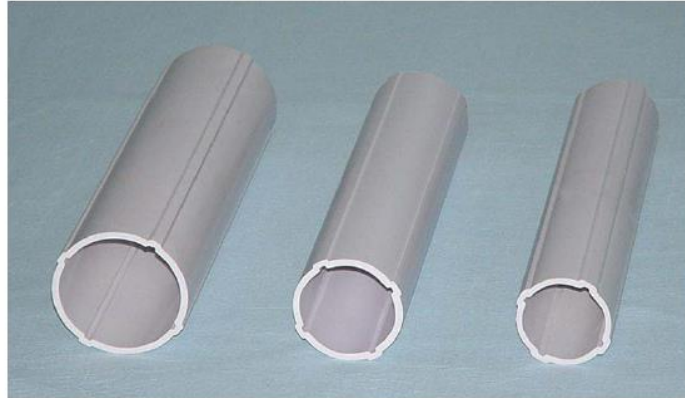


Figura 27. Tubi inclinometrici in PVC

Dopo l'installazione del tubo, si effettua una prima serie di misure per determinare l'inclinazione del tubo. Per confronto con le misure inclinometriche successive, si determinano le variazioni dell'inclinazione. Assicurandosi che una delle estremità del tubo non possa traslare, o misurando la traslazione con altri mezzi, si possono determinare le deformazioni orizzontali assolute di ogni punto lungo il tubo. Il trasduttore più utilizzato è l'accelerometro a bilanciamento di forza. Consiste in una massa, libera di oscillare in un piano, sospesa nel campo magnetico di un rilevatore di posizione, quando, per effetto della gravità e dell'inclinazione della sonda, la massa si muove dalla posizione iniziale, il rilevatore aziona una bobina che impartisce alla massa una forza elettromagnetica uguale e contraria alla forza di gravità in modo da tenerla in equilibrio. Il voltaggio della bobina può essere misurato ed essendo direttamente proporzionale alla forza si può determinare l'inclinazione della sonda. Di questo strumento ne esiste una versione cosiddetta biassiale, in essa vi sono due trasduttori, montati uno sopra l'altro, che rilevano l'inclinazione della sonda in due piani ortogonali tra loro. Ciò consente di effettuare le due serie di misure calando la sonda una sola volta nel tubo. Questo strumento ha l'intervallo di misura più esteso degli altri ($\pm 30^\circ$ opzionalmente $\pm 90^\circ$), un'ottima precisione ed è praticamente esente da limitazioni, ciò ha fatto sì che trasduttori a resistenza elettrica, a corda vibrante e altri siano sempre meno usati.



Figura 28. Sonde inclinometriche

> 5.3 Unità di lettura

I principali fattori che influenzano la precisione dei dati inclinometrici sono:

- La precisione intrinseca del trasduttore.
- Le piccole oscillazioni della sonda quando è inserita nelle guide del tubo che ne modificano l'inclinazione. Per minimizzare le oscillazioni le ruote devono essere progettate in modo da avere il minimo gioco laterale, da adattarsi bene al profilo delle guide, devono essere sostituite quando cominciano ad usurarsi, ed anche le guide del tubo devono essere realizzate con precisione e mantenute ben pulite (sia da eventuali infiltrazioni di materiale in corrispondenza dei giunti, sia da eventuali prodotti di ossidazione nel caso di tubi in metallo), i tubi di diametro maggiore riducono l'errore dovuto alle oscillazioni.
- L'orientazione delle scanalature del tubo non è detto che sia la stessa in profondità ed in superficie, l'effetto spirale produce una variazione del piano in cui viene misurata l'inclinazione. L'effetto spirale può essere dell'ordine di 1° per

3m di lunghezza, il problema riguarda sia i tubi in plastica che quelli in alluminio, nel caso di tubi in plastica l'esposizione al sole prima della messa in opera può causare o accentuare l'effetto, lo stesso vale nel caso l'installazione non sia eseguita con cura. Quando è possibile si devono assemblare elementi di tubo i cui effetti spirale si annullino a vicenda. L'entità della deviazione deve essere misurata prima dell'installazione per ogni segmento di tubo per poterne tenere conto; esistono anche delle sonde particolari che ne consentono la misura anche quando il tubo è in opera, il loro uso è sempre consigliato nel caso d'installazioni più profonde di 60m, infatti le installazioni così profonde hanno quasi sempre un effetto spirale.

- Le deformazioni cui va soggetto il tubo nel tempo, a causa del movimento del terreno, possono raggiungere un'entità tale da rompere il tubo e renderlo quindi inutilizzabile, o comunque possono causare delle curvature tali che la sonda non riesce più a passare nel tubo. Quando si prevedono forti deformazioni è necessario utilizzare tubi di diametro maggiore, in quanto un diametro maggiore, a parità di deformazione, può consentire il passaggio della sonda; e comunque si può anche ricorrere a sonde di dimensioni ridotte. In ogni caso se la distanza tra i punti di misura è maggiore di quella tra le ruote della sonda e la curvatura del tubo è significativa possono sorgere degli errori.
- La temperatura può influire sui trasduttori e sulle unità di lettura che devono essere adeguatamente protette, ai trasduttori si deve dare il tempo di stabilizzarsi alla temperatura di esercizio prima di effettuare le misure.

La prima elaborazione dei dati dovrebbe essere fatta direttamente sul campo man mano che si effettuano le misure, essa consiste nel check sums, un test per valutare l'attendibilità dei dati che consiste nel calcolare la somma algebrica delle misure rilevate alla stessa quota nel tubo, ma con la seconda misura effettuata ruotando la sonda di 180° intorno al suo asse. Tale somma dovrebbe essere uguale a due volte il bias, cioè il valore indicato dallo strumento quando si trova perfettamente in verticale. Il bias, che teoricamente dovrebbe essere zero, ha generalmente valori piccoli ma diversi da zero secondo il tipo di strumento.

Questa elaborazione dei dati consente di minimizzare gli errori sistematici dello strumento e quelli causati dall'irregolarità del tubo. Il check sums teoricamente dovrebbe rimanere costante per tutti gli intervalli di profondità, in realtà esso varia intorno ad un valore medio secondo le condizioni del tubo, le prestazioni dello strumento e la tecnica dell'operatore.

Piccole variazioni non sono generalmente indicative di problemi, ma se diventano più grandi allora possono essere dovute ad irregolarità nel tubo (es. sporcizia o deformazione delle guide), nel funzionamento della sonda (sia nella parte elettrica che in quella meccanica: es. usura delle ruote) o nella tecnica dell'operatore (es. scarsa precisione nella misura della profondità).

L'elaborazione dei dati continua con il calcolo delle differenze tra le letture effettuate alla stessa profondità ruotando la sonda di 180° ; e quindi con il calcolo delle variazioni d'inclinazione ad ogni quota, sottraendo dal valore rilevato il corrispondente valore delle differenze tra le letture effettuate ruotando la sonda di 180° , calcolato al punto precedente. Il trasduttore di inclinazione contenuto nella sonda fornisce l'angolo zenitale, θ , quest'ultimo, nota la distanza tra le letture, L , ci permette di determinare la deviazione dalla verticale del punto di misura, $L\sin\theta$.

> 5.4 Elaborazione dei dati

Si effettua il calcolo delle variazioni cumulate sommando i dati delle variazioni dal fondo verso l'alto e la conversione delle variazioni cumulative in unità di deformazione in quanto le variazioni di inclinazione vengono riportate secondo l'unità di misura dello strumento. Un esempio dei risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati inclinometrici è riportato in figura 29. Qualora l'effetto spirale sia significativo e ne sia stato eseguito un rilevamento per conoscerne l'entità ad ogni quota, questi dati possono essere utilizzati per conoscere la vera direzione delle deformazioni, o la deformazione in una direzione data.

Queste elaborazioni, data la mole di dati, vengono generalmente eseguite con l'ausilio di un calcolatore. Il grafico delle variazioni in funzione della quota serve per evidenziare le zone di deformazione, quello delle variazioni cumulate serve per avere una visione d'insieme del modello di deformazione. Un terzo grafico, della deformazione in funzione del tempo ad una quota fissata (ovviamente si possono fare più grafici a quote diverse) è particolarmente utile per studiare l'evoluzione delle deformazioni e fare previsioni.

6. ESTENSIMETRI

Sono utilizzati per il monitoraggio delle variazioni di distanza tra due o più punti lungo un asse comune, non necessariamente verticale. Sono strumenti che consentono di verificare le variazioni dell'apertura delle discontinuità. Permettono di ricavare, oltre all'apertura di fessure anche il valore delle tensioni. Possono essere meccanici (asta o a filo), elettrici (a resistenza) ed ottici. Alcuni estensimetri comunemente impiegati sono riportati in figura 30.

Estensimetri ad asta e a filo: sono adatti a controllare i micromovimenti profondi della roccia o del terreno. In particolare essi misurano le variazioni relative della distanza tra un riscontro esterno e uno o più punti di ancoraggio distribuiti a profondità diverse entro un foro. Entrambi sono muniti o di misuratori meccanici (con comparatore centesimale) o di misuratori elettrici (con trasduttori lineari di spostamento).

Barretta estensimetrica: misura le deformazioni di una struttura in cls durante l'esercizio, consentono il calcolo degli sforzi ai quali essa è sottoposta. Il trasduttore si compone di uno o più estensimetri, collegati a ponte interno, applicati su una barra in acciaio le cui estremità vengono legate o saldate ai ferri d'armatura. Alcune barre estensimetriche comunemente impiegate in strutture in cls sono riportate in figura 31.

Misuratori di giunti: trovano impiego nel monitoraggio di crepe. Il sistema di ancoraggio è autoallineante, per adattarsi a movimenti non lineari. La facilità di montaggio lo rende particolarmente adatto al monitoraggio di crepe in posizioni scomode. Le misure si possono effettuare con centraline di lettura manuali o con acquisizione dati (monocanale o a più canali). Possono essere dotati di sensore di temperatura e di trasmettitori per acquisizione dei dati da località remote. Alcuni modelli di misuratori di giunti sono riportati in figura 32.

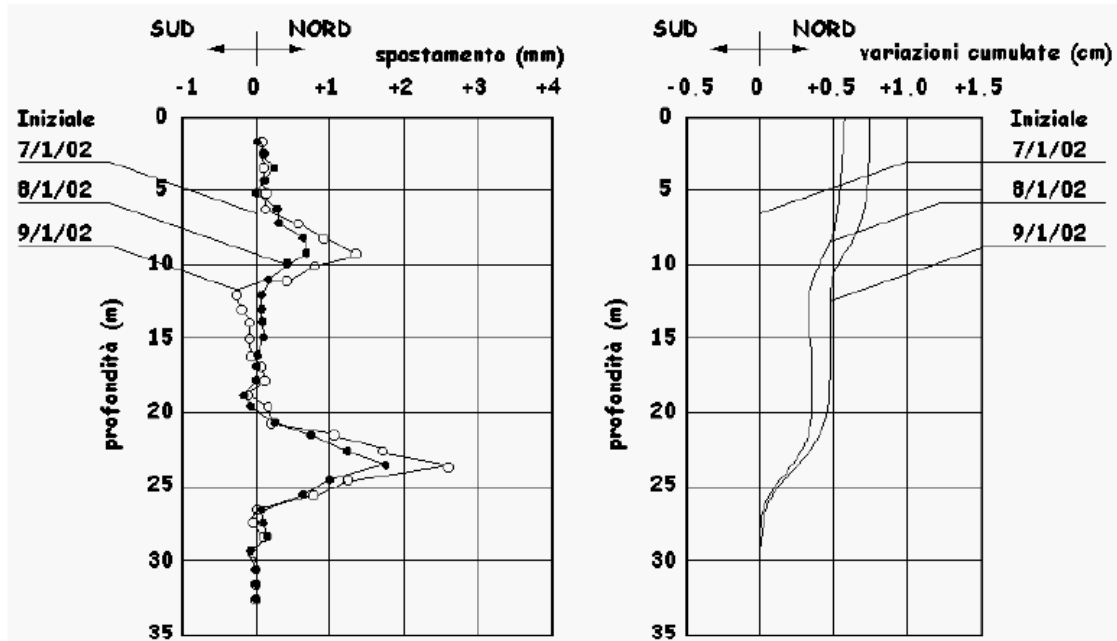


Figura 29. Esempio di elaborazione dei dati inclinometrici



Figura 30. Estensimetri

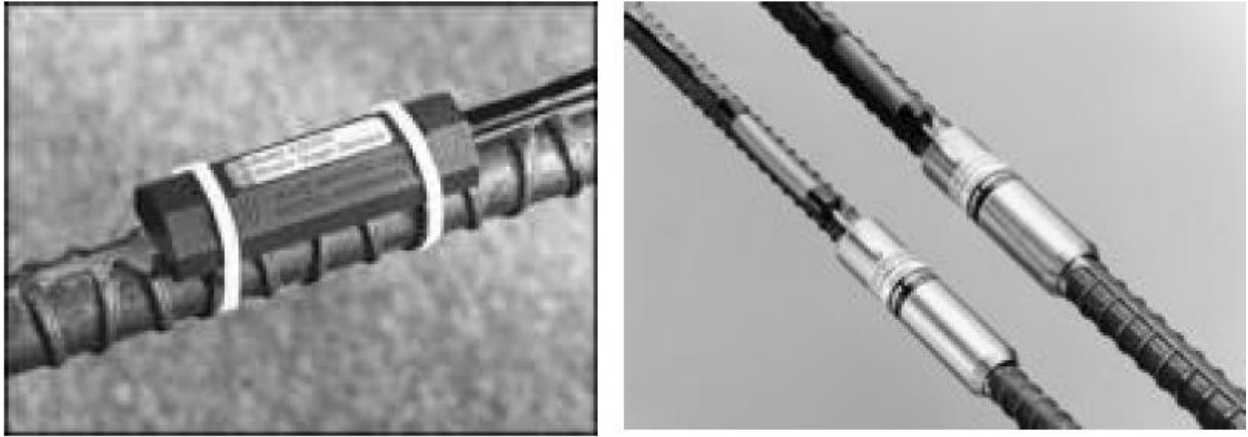


Figura 31. Barre estensimetriche impiegate in getti di cls

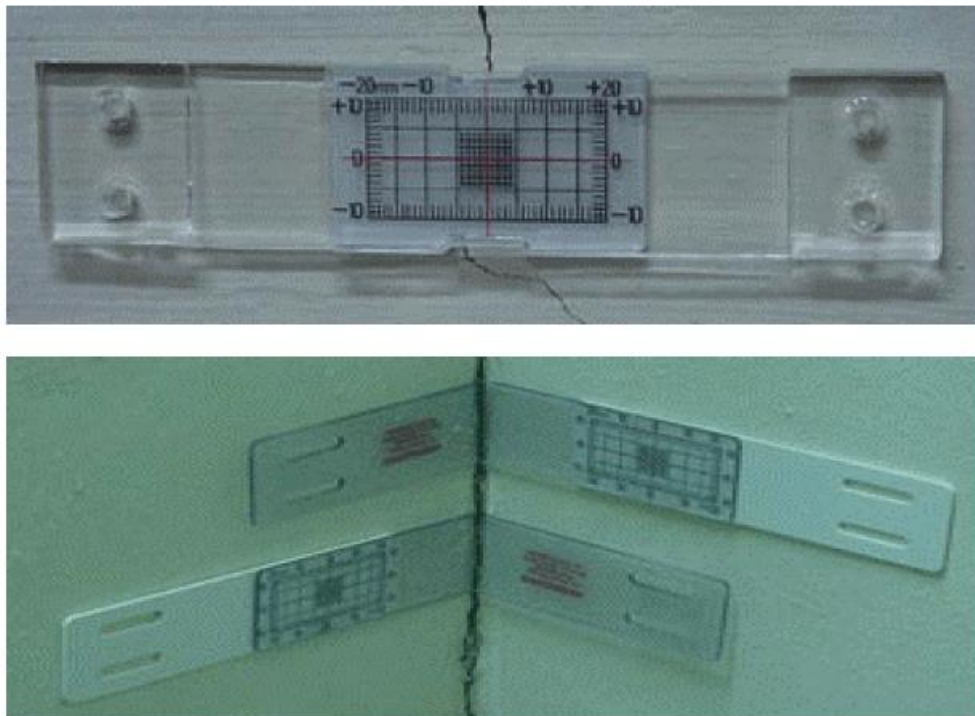


Figura 32. Misuratori di giunti

