



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
FISICA

CICLO XXII

COORDINATORE Prof. Frontera Filippo

STUDIO DI ACCELEROMETRI MEMS
E LORO UTILIZZO COME INCLINOMETRI
PER MONITORAGGIO FRANE

Settore Scientifico Disciplinare FIS/01

Dottorando

Dott. Ferrari Federico

Tutore Interno

Prof. Dalpiaz Pietro

Tutore Esterno

Prof. Pedrielli Francesco

Anni 2007/2009

Indice

Introduzione	1
1. Il sistema di misura	5
1.1.Panoramica sul sistema	6
1.2.Gli inclinometri	10
1.2.1. <i>La tecnologia MEMS</i>	10
1.2.2. <i>Accelerometri MEMS</i>	14
1.3.Hardware e software di acquisizione e tele-gestione	27
1.3.1. <i>Elettronica del sistema</i>	29
1.3.2. <i>Software di basso livello e funzioni di base del sistema</i>	33
2. Elaborazione dei dati e taratura dei sensori	37
2.1.Taratura dei sensori	38
2.1.1. <i>Formattazione e conversione dei dati raccolti</i>	38
2.1.2. <i>Il sensore di temperatura</i>	41
2.1.3. <i>Calibrazione degli inclinometri</i>	45
2.2.Errore raziometrico	53

3. Analisi dei risultati	69
3.1. Confronto diretto con gli inclinometri “tradizionali”	70
3.1.1. Risultati del 27 febbraio 2009	77
3.1.2. Risultati del 27 ottobre 2009	89
3.2. Il sistema “fisso”	98
3.2.1. Dati relativi al sistema nell’ultima versione	104
3.2.2. Stabilizzazione della tensione d’alimentazione	110
Conclusioni	121
Appendice A	125
Appendice B	140
Bibliografia	147
Ringraziamenti	

Introduzione

L'oggetto di questa tesi è uno studio condotto sull'impiego di accelerometri MEMS (Micro Electro-Mechanical System) per la misura delle inclinazioni, con l'obiettivo di utilizzarli in applicazioni geotecniche di monitoraggio di eventi franosi.

I dati emersi dal progetto IFFI (Inventario Fenomeni Franosi in Italia) hanno mostrato che, al 31 dicembre 2006, sul territorio italiano erano presenti 469.298 fenomeni franosi, distribuiti su un'area poco inferiore a 20.000 km², corrispondente a circa il 6.6% del territorio nazionale.

Questi dati sottostimano il reale numero di frane esistenti, poiché finora il censimento si è concentrato sulle aree maggiormente abitate. L'aumento dell'urbanizzazione è destinato quindi a incrementare il *rischio idrogeologico*, che è definito come segue (Varnes et al., 1984)

$$R = P \times E \times V$$

dove R è il *rischio*, P la *pericolosità*, E sono gli *elementi a rischio* e V esprime la *vulnerabilità* di tali elementi. Con *pericolosità* s'intende la

probabilità che in una data area, in un certo intervallo temporale, avvenga un evento potenzialmente dannoso. I danni che derivano da questi eventi colpiscono gli *elementi a rischio* (popolazione, infrastrutture, attività economiche, ecc.), che possono subire danni di diversa entità, secondo la loro *vulnerabilità*.

Il monitoraggio delle frane non si propone come soluzione del problema, ma contribuisce a ridurre il *rischio*, poiché consente di svolgere un'azione preventiva e di conoscenza della morfologia del territorio.

Fra gli strumenti impiegati nel monitoraggio degli eventi franosi, troviamo estensimetri, inclinometri, piezometri, radar da satellite, laser scan e sistemi di triangolazione per il rilevamento della posizione. Molti di questi però si basano su campagne di misura eseguite periodicamente, con la conseguenza che, a causa dei costi, gli intervalli fra i monitoraggi tendono a dilatarsi, riducendo così la quantità d'informazioni a disposizione. D'altra parte questi strumenti, specialmente se ci riferiamo alle sonde inclinometriche, non costituiscono la migliore soluzione per realizzare sistemi di monitoraggio automatico da installare permanentemente nei siti di misura.

Un tale approccio, infatti, richiede l'impiego di sistemi multi-sensore, e comunque prevede un elevato rischio di perdere gli inclinometri installati, il cui costo è rilevante (qualche migliaio di euro). Se consideriamo le sonde inclinometriche, buona parte del costo del sistema di misura è costituita dal trasduttore, per cui l'installazione di un sistema *fisso* è economicamente molto onerosa.

Dato il quadro generale, è nata l'idea di utilizzare sensori MEMS per il monitoraggio delle frane. Gli accelerometri basati su questa tecnologia erano già abbastanza sviluppati al momento dell'inizio di questo progetto, ma negli ultimi anni hanno visto crescere esponenzialmente le loro prestazioni e il numero di ambiti applicativi in cui sono utilizzati (automotive, elettronica di consumo, intrattenimento, ecc.).

Il costo degli accelerometri MEMS, fa di questi trasduttori la soluzione migliore per la realizzazione di sistemi multi-sensore, da impiegare in installazioni permanenti. Il loro utilizzo però richiede uno studio preliminare perché la filosofia alla base della produzione di questi sensori è orientata alla vendita su larga scala (centinaia di milioni di esemplari) e quindi le loro caratteristiche tecniche non sono ottimizzate per applicazioni di elevata precisione, come per esempio i servo-inclinometri utilizzati per il monitoraggio frane.

In questo lavoro si descrive lo studio svolto per sviluppare un sistema innovativo di monitoraggio degli eventi franosi, basato su accelerometri MEMS triassiali. Impiegando questi sensori in modo statico, cioè misurando la scomposizione vettoriale dell'accelerazione di gravità sui tre assi del sensore, è possibile ottenere l'informazione sull'inclinazione.

La progettazione del prototipo è stata orientata alla realizzazione di un sistema di monitoraggio *fisso* e completamente automatico, basato su più accelerometri, con un costo inferiore alla strumentazione "tradizionale" e in grado di fornire risultati comparabili, ma con frequenza dei monitoraggi molto maggiore e conseguente aumento dei dati disponibili.

Nel primo capitolo di questa tesi si descrive il prototipo di sistema *fisso* realizzato per il *Servizio Lavori Speciali Opere pubbliche* della *Provincia di Modena*. Oltre a illustrare il principio di funzionamento e la struttura di tale sistema, si fornisce una descrizione dei MEMS, con particolare riferimento agli accelerometri. Infine si forniscono informazioni più dettagliate riguardanti gli elementi hardware e software del sistema.

Nel secondo capitolo si espongono le procedure seguite per la calibrazione dei sensori, con informazioni riguardo alle loro caratteristiche e agli errori che affliggono le misure.

Il terzo capitolo è dedicato alla presentazione dei risultati ottenuti dalle misure di monitoraggio in cui abbiamo utilizzato i sensori MEMS. In primo luogo si espongono i risultati del confronto di un nostro inclinometro, con una sonda basata su servo-inclinometro “tradizionale”. In seguito si descrive l’evoluzione che ha portato all’attuale versione del sistema *fisso*, del quale sono esposti i risultati finora ottenuti e le problematiche ancora da affrontare, che saranno oggetto di futuri studi.

In questa sede, desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Francesco Pedrielli, per avermi coinvolto in questo progetto, di cui è ideatore, e per avermi seguito in tutte le fasi del lavoro che hanno portato alla redazione di questa tesi.

Rivolgo un ringraziamento particolare al Prof. Pietro Dalpiaz, mio tutore per il Dottorato di ricerca in Fisica, per il prezioso aiuto e supporto concesso.

Un ringraziamento speciale è rivolto ai referee, Prof. Luigi Carmignani e Dott. Giuseppe Miccoli per la disponibilità dimostrata nei miei confronti e per aver messo a disposizione le loro competenze. Infine, ringrazio il personale del Servizio Lavori Speciali Opere pubbliche della Provincia di Modena, per la preziosa collaborazione, e ST Microelectronics, per aver fornito gratuitamente i sensori impiegati in questa ricerca.

Capitolo 1.

Il sistema di misura

In questo capitolo è descritto un sistema di misura innovativo per il monitoraggio automatico e continuo dell'evoluzione dei fronti franosi. Scopo del progetto è l'utilizzazione in campo geotecnico degli accelerometri MEMS (Micro Electro Mechanical System), già affermati in altri settori.

Inizialmente si offre una panoramica sul sistema di monitoraggio in questione, descrivendone le caratteristiche generali e la struttura.

Si prosegue introducendo la tecnologia MEMS: un cenno storico sulle sue origini; le principali peculiarità tecniche che la identificano; la tipologia dei sensori da noi impiegati e le loro caratteristiche.

Segue una descrizione degli elementi meccanici e dell'elettronica che costituiscono l'apparato: la struttura snodata d'acciaio inox, definita "*ago*", che costituisce il tramite fra il movimento del terreno e la misura inclinometrica; la catena di sensori costituita da accelerometri MEMS utilizzati in modalità statica (cioè come inclinometri) e da sensori di temperatura; l'elettronica appositamente realizzata per

acquisire i segnali provenienti dai trasduttori e per gestire i protocolli di trasmissione dei dati via modem.

Infine è illustrato il software di basso livello, che gestisce l'acquisizione dei dati.

1.1. Panoramica sul sistema

Questo sistema di monitoraggio è stato ideato con l'intento di sostituire i tradizionali metodi utilizzati per controllare lo stato del fronte di una frana. Il prototipo è stato installato per conto del Servizio Lavori Speciali Opere pubbliche della Provincia di Modena al fine di controllare la frana di Lezza Nuova, sull'Appennino Modenese fra Montefiorino e Frassinoro.

Tale sistema fornisce notevoli vantaggi, fra cui:

- Il completo automatismo, che permette di risparmiare risorse umane e quindi economiche. Il personale addetto potrà controllare in qualsiasi momento lo stato del fronte franoso, semplicemente interrogando il sistema (in remoto) dai propri uffici. Sono quindi eliminati, o quantomeno ridotti drasticamente, gli interventi in frana. Inoltre, il software che gestisce il sistema permette all'utente di pianificare liberamente il numero di chiamate, che avverranno in modo completamente automatico durante la giornata. Ciò consente di avere un maggiore numero di dati, non essendo la loro raccolta vincolata a campagne di misura, fra le quali di solito intercorrono mesi;
- Un sistema "*fisso*", cioè permanentemente installato sul fronte franoso, aumenta la durata operativa del sito di misura. Le tecniche tradizionali sfruttano un carrello equipaggiato con un servo-inclinometro. Esso è calato all'interno di un tubo munito di guide, che penetra in profondità nel terreno fino a raggiungere lo strato fisso sotto la frana. I movimenti degli strati franosi deformano il tubo fino a renderlo inutilizzabile

(già per slittamenti dell'ordine di 10 cm/m) per cui, per proseguire il monitoraggio, è necessaria una nuova perforazione del terreno. Il sistema da noi proposto invece, richiede una perforazione solo al momento dell'installazione, potendo seguire movimenti elevati grazie ai giunti cardanici inseriti;

- È possibile una considerevole diminuzione delle spese, grazie al basso costo della strumentazione, ma soprattutto imputabile a spese di gestione molto contenute, con massimizzazione dell'informazione e la capacità di giudicare iniziative da intraprendere ai fini della sicurezza dell'ambiente circostante la frana.

Gli accelerometri MEMS rappresentano l'innovazione tecnologica che ha reso possibile la realizzazione del sistema di monitoraggio descritto in questo lavoro.

L'apparato è adattabile a qualsiasi situazione di misura e quindi alla morfologia del fronte franoso da monitorare.

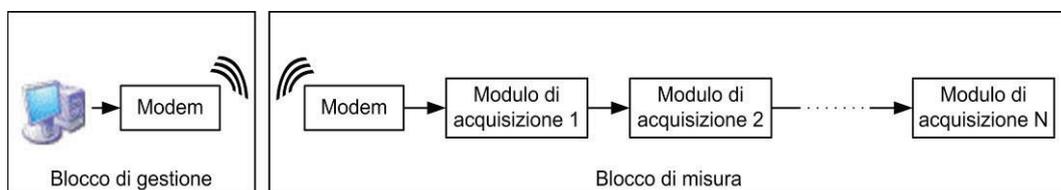


Figura 1: Schema a blocchi del sistema di monitoraggio, rappresentato in base alle sue caratteristiche di modularità.

Nella Figura 1 è possibile vedere una schematizzazione che evidenzia le parti principali del sistema.

Il *blocco di gestione* è costituito da un computer, sul quale è installato il software, che ha il compito di eseguire le chiamate via modem, archiviare i dati e analizzarli. Il blocco di gestione è in grado di controllare più blocchi di misura (più frane).

Il *blocco di misura* comprende un modem e uno o più moduli di acquisizione. Il numero e la configurazione di questi ultimi, dipende: dal numero di punti in cui si desidera compiere le misure; dalla profondità cui occorre arrivare; dalla risoluzione che si vuole ottenere

nel definire il profilo delle superfici di scorrimento¹. Nella Figura 2 è illustrato, in maniera schematica, un *modulo di acquisizione*, che comprende:

- Una scheda in superficie con il compito di fornire alimentazione e gestire gli inclinometri connessi. Queste schede possono essere collegate in serie fra loro, nel caso in cui vi siano più perforazioni e quindi più punti in cui eseguire il monitoraggio;

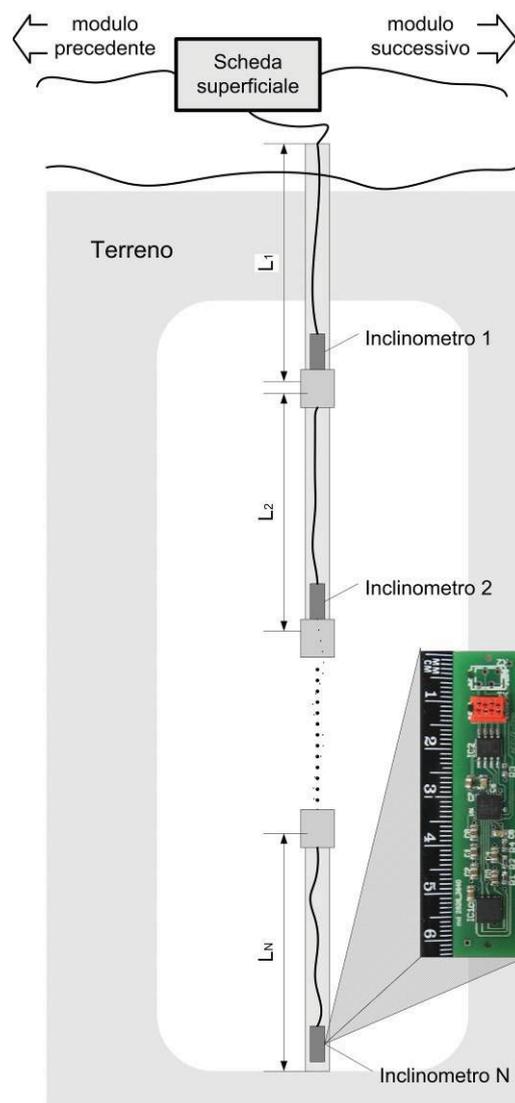


Figura 2: Schema illustrativo di un *blocco di misura* inserito nel terreno. Nella Figura: la scheda di superficie; i segmenti dell'ago; gli inclinometri, con la foto di uno di essi affiancato ad una scala centimetrata.

¹ Con superficie di scorrimento s'intende la zona d'interfaccia fra due strati di terreno in moto relativo fra loro.

- Un “ago”, composto di N tubi d'acciaio inox di lunghezza L_i , collegati fra loro da un giunto cardanico. Tali tubi sono cavi e all'interno di ognuno si trova un inclinometro, rigidamente vincolato al tubo, che consente di misurarne l'inclinazione. I sensori sono connessi in parallelo, tramite un cavo flat a 4 poli che va dalla scheda di superficie fino all'ultimo inclinometro.

In sede di progettazione del sistema, oltre a poter decidere il numero di moduli di acquisizione, è possibile variare, secondo le circostanze, il numero N di sensori e la lunghezza L_i di ciascun tubo. In questo modo si agisce sulla risoluzione della misura e sulla possibilità di raggiungere maggiori profondità.

Il prototipo installato sulla frana di Lezza Nuova è costituito da 5 *blocchi di misura*, ciascuno con 6 inclinometri, posizionati a 2 metri di distanza l'uno dall'altro, per una profondità totale di 12 m.

La gestione dell'apparato è affidata a un software realizzato in ambiente di sviluppo LabVIEW. Questo, come già anticipato, permette all'utente di pianificare le interrogazioni automatiche. A occuparsi di queste acquisizioni è un servizio di sistema, installato nel PC su cui risiede il software, che si attiva all'avvio del computer. Gli orari delle acquisizioni possono essere liberamente scelti nell'arco delle 24 ore di una giornata.

Oltre a gestire le interrogazioni, il software consente di analizzare i dati raccolti, attraverso alcuni strumenti appositamente realizzati. In particolare, per ciascun modulo di acquisizione è possibile visualizzare due grafici, tipicamente utilizzati in questo tipo di studi: il diagramma polare, che rappresenta vettorialmente gli spostamenti dei tubi che compongono l'ago; la risultante dello spostamento, che ne indica il modulo.

La costruzione di questi grafici avviene trigonometricamente, partendo dalle misure d'inclinazione dei singoli tubi e dalla loro lunghezza. Inoltre, ogni rappresentazione di questo tipo può essere rapportata a un preciso intervallo temporale definito dall'utente, al

fine di poter valutare le variazioni del sistema sia su lunghi che brevi periodi.

Va ribadito che con questo sistema è possibile effettuare un numero elevato di acquisizioni, creando in questo modo un database molto ricco, dal quale ricavare curve di tendenza dei vari parametri di interesse, che possono costituire un valido strumento di studio e un possibile sistema di allarme potendo avere una raccolta dati con cadenza dell'ordine del minuto.

1.2. Gli inclinometri

1.2.1. La tecnologia MEMS

Con MEMS (acronimo di Micro Electro Mechanical System), o microsistemi, sono indicati una serie di dispositivi costituiti da elementi di dimensioni micrometriche. Tale definizione non implica la presenza di particolari funzionalità e non è in alcun modo restrittiva, riguardo alle caratteristiche costruttive. In linea di principio, si tratta di sistemi che al loro interno racchiudono sia componenti meccanici che elettronici. Questi, assemblati opportunamente, costituiscono trasduttori e/o attuatori direttamente interfacciati con l'elettronica di acquisizione e condizionamento del segnale, che è parte integrante del sistema.

L'invenzione del primo transistor avvenuta nei laboratori Bell nel 1947 diede inizio allo sviluppo della microelettronica, che portò ad un altro traguardo storico nel 1958, quando la Texas Instruments realizzò il primo circuito integrato. I primi passi nell'ambito dei microsistemi furono mossi nel 1954 con la realizzazione di un sensore di pressione al silicio, poi commercializzato nel 1958. Da allora, lo sviluppo dei microsensori si è rivolto alla realizzazione di strutture sempre più complesse, stimolando in tal modo la ricerca, e focalizzandola sul miglioramento dei processi costruttivi. La crescita di questa tecnologia ha portato anche a coniare nuovi termini specifici: per esempio,

all'inizio degli anni '80, si diffuse il termine "micromachining" per indicare la fabbricazione delle parti meccaniche dei microsistemi. L'affinamento delle procedure impiegate nel *micromachining* ha condotto per la prima volta, nel 1987, alla realizzazione di veri e propri micro meccanismi, costituiti da parti in movimento fra loro. In precedenza, ciò non era possibile: si potevano sfruttare solamente le proprietà elastiche dei materiali per ottenere la flessione dei componenti e quindi un loro spostamento relativo. Questo traguardo fondamentale consentì di aumentare considerevolmente la versatilità dei microsistemi, aprendo la strada a nuovi campi applicativi.

La produzione di MEMS coinvolge principalmente tecniche di fotoincisione, che consentono la lavorazione planare dei materiali utilizzati e tecniche di deposizione e/o accrescimento cristallino per creare strutture nella terza dimensione. Possiamo individuare le principali famiglie di processi per il "*micromachining*":

- Bulk micromachining - le parti meccaniche vengono realizzate all'interno del substrato e sono ottenute rimuovendo parti consistenti di quest'ultimo. Tale tecnica è particolarmente adatta per ottenere strutture mobili e cavità di dimensioni rilevanti;
- Surface micromachining - queste tecniche prevedono il deposito di strati sottili di materiale sul wafer. Questi vengono poi rimossi selettivamente in modo che i residui costituiscano la struttura desiderata;
- Epi-micromachining - insieme di tecnologie che consentono di realizzare la struttura meccanica nello strato epitassiale, che in genere ha uno spessore di $2-10\mu\text{m}$, oppure in uno strato superficiale di spessore equivalente;
- LIGA (Lithographie Galvanik Abformung) - acronimo tedesco che prende spunto dai principali processi che costituiscono questa tecnica: litografia, che consente di raggiungere risoluzioni elevate tramite l'utilizzo dei raggi X (in alternativa, si sfrutta anche l'ultravioletto – UV LIGA), elettrodeposizione e

stampaggio. Questa tecnologia è apprezzata per l'elevata risoluzione spaziale, che consente di ricavare strutture molto definite, sia quando sono richieste forme smussate che a elevato fattore di forma.

È importante rilevare che ognuna delle tecnologie cui si è accennato presenta delle particolarità che la possono rendere conveniente o meno, secondo il risultato da perseguire. Inoltre, il fatto che molte di queste prevedano processi in comune con le normali tecniche di produzione dei circuiti integrati, rende conveniente l'integrazione fra componenti meccaniche ed elettroniche che possono essere sviluppate parallelamente durante la lavorazione, favorendo in questo modo la riduzione delle dimensioni e, di conseguenza, l'abbattimento dei costi. Il silicio è fra i materiali più diffusi per la realizzazione di MEMS, principalmente grazie al fatto che i processi "presi in prestito" dalla fabbricazione di circuiti integrati sono ottimizzati per la sua lavorazione. Tuttavia, la grande varietà di tecniche costruttive in questo momento utilizzabili, unita alla disponibilità di nuovi materiali, ha reso più semplice l'impiego di questi ultimi in maniera selettiva, in base alle caratteristiche più consone per determinate funzioni: la composizione dei microsistemi è quindi sempre più eterogenea, sia per quanto riguarda i materiali impiegati, che dal punto di vista della sovrapposizione dei processi produttivi.

L'evoluzione tecnologica dei microsistemi li ha portati a diffondersi in svariati ambiti, sostituendo gradualmente i dispositivi tradizionali. Inoltre, la presenza d'investimenti sempre maggiori fa capire che in futuro, questo passaggio alla tecnologia MEMS sarà sempre più rilevante. Attualmente, i principali campi d'impiego sono:

- Automotive, controllo industriale e meccanica - sono realizzati sensori di pressione, sensori inerziali (giroscopi, accelerometri) trovano applicazione nei sistemi di navigazione, nei dispositivi di sicurezza, nel controllo delle vibrazioni, ecc.;
- Chimica e biotecnologie - sono impiegati per controlli di flusso, come micro pompe da vuoto, per applicazioni sul DNA , ecc.;

- Ottica – micro ottica IR, array di micro lenti, diffusori, ecc.;
- Dispositivi RF (Radio Frequenza).

L'elevata diversificazione dei MEMS si riflette anche sul packaging (insieme dei processi che consentono di racchiudere i componenti del microsistema in un involucro protettivo). Si tratta di uno dei momenti più delicati della progettazione di questi dispositivi: alcuni sensori/trasduttori devono essere completamente isolati dall'ambiente esterno, mentre altri richiedono di esservi in contatto per interagire con esso mantenendo al contempo isolate i componenti elettronici. È chiaro che rispetto al packaging tradizionale dei CI, i microsistemi presentano notevoli complicazioni. Le soluzioni praticabili sono anche in questo caso svariate, poiché sono disponibili incapsulamenti metallici, ceramici e plastici, che presentano caratteristiche molto differenti fra loro. La scelta del tipo d'involucro è determinante per definire il prezzo di un MEMS e quindi influisce significativamente sulla competitività nel mercato, dove, con prezzi al dettaglio di solito inferiori a 5€, i MEMS più economici sono quelli con packaging in plastica. La natura low-cost dei microsistemi è una delle loro caratteristiche più importanti, soprattutto considerando che le prestazioni raggiunte sono paragonabili e, spesso, migliori di quelle dei dispositivi tradizionali cui si contrappongono.

È opportuno chiudere questa panoramica sulla tecnologia MEMS elencando i principali vantaggi offerti dai microsensori:

- Costi molto inferiori alla strumentazione tradizionale, ottenuti grazie all'utilizzo di tecniche costruttive che consentono produzione di grandi numeri di esemplari;
- Elevata sensibilità, grazie alla precisione sub-micrometrica dei processi di produzione;
- Dimensioni ridotte, dell'ordine di 5x5 mm e anche inferiori, che agevolano la realizzazione di configurazioni multi sensore;
- Elevata integrazione fra trasduttore e elettronica (conversione A/D e condizionamento del segnale), che permette un rapporto segnale/rumore più elevato dei sensori tradizionali;

- Bassi consumi, inferiori a 1mA, principalmente dovuti alle due precedenti caratteristiche;
- Robustezza e affidabilità tipiche dei circuiti integrati.

Secondo le applicazioni e quindi in base al tipo di sensori da utilizzare, varia l'importanza relativa dei vantaggi offerti dall'impiego dei MEMS. Il paragrafo successivo descrive in maniera più approfondita le caratteristiche degli accelerometri MEMS e i fattori che li rendono una scelta decisiva per la realizzazione del sistema di monitoraggio descritto in questa tesi.

1.2.2. Accelerometri MEMS

Gli accelerometri, assieme ai giroscopi, costituiscono la famiglia dei sensori inerziali, che si basano sul seguente principio di funzionamento: essi misurano lo spostamento di una massa inerziale, parte integrante del sensore, quando su esso agisce una forza. L'iniziale diffusione di questi MEMS si deve soprattutto al loro utilizzo in campo automobilistico, nei sistemi di sicurezza installati sui veicoli, come per esempio gli air-bag. Questo settore ha continuato a fare da volano per lo sviluppo di questa tecnologia che oggi si utilizza anche nei sistemi automatici di navigazione e di controllo della stabilità dei veicoli, per i quali è stato necessario raggiungere livelli prestazionali elevati. Negli ultimi anni, si assiste a una maggiore diffusione di questi sensori che stanno diventando di comune utilizzo in molti prodotti elettronici di uso comune, come cellulari, macchine fotografiche, notebook, ecc.

Tali sensori non necessitano essere in contatto con l'ambiente esterno, per cui sono sigillati mediante un incapsulamento ermetico, con modalità differenti, a seconda del materiale utilizzato per il packaging. Possiamo descrivere il funzionamento di un accelerometro come quello di un sistema molla-massa-ammortizzatore, come illustrato nella Figura 3a.

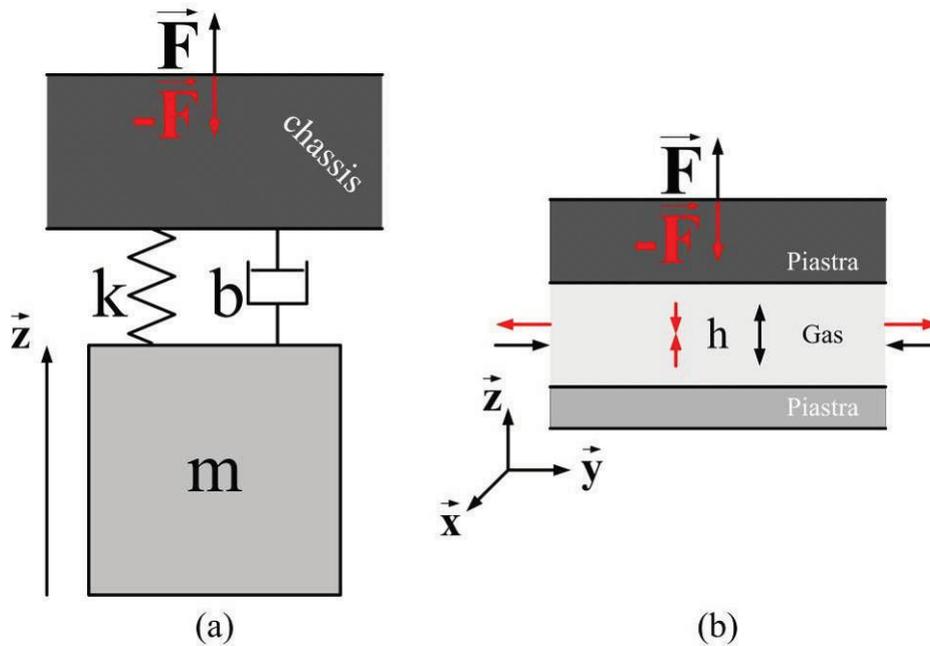


Figura 3: (a) Sistema molla-massa-ammortizzatore; (b) Esempificazione dell’azione della forza di smorzamento (*squeezed-film damping*).

In questo caso si tratta di un sensore che rileva l’azione di forze che agiscono lungo la direzione dell’asse \vec{z} . Sempre nella Figura 3a, k è la costante elastica della struttura che collega m , massa inerziale, allo chassis del sensore. L’elemento smorzante c , è invece rappresentato dal cosiddetto “*squeezed-film damping*” (Senturia, 2001), cui fa riferimento la Figura 3b. Quando le due piastre mostrate nell’illustrazione si avvicinano (freccie rosse), h diminuisce e aumenta la pressione del gas nell’intercapedine, che è spinto fuori dagli estremi delle piastre (freccie rosse). Al contrario, quando si allontanano (freccie nere), h aumenta e il gas è risucchiato nello spazio fra le piastre (freccie nere) a causa della diminuzione di pressione. L’attrito viscoso del gas che fluisce fra le piastre genera una forza meccanica dissipativa che si oppone al moto. Questo effetto smorzante avviene quando un gas occupa lo spazio fra due piastre parallele e la distanza h fra queste, è molto minore delle loro dimensioni sul piano x, y (cfr. Figura 3b). Esistono anche altre condizioni necessarie affinché occorra lo *squeezed-film damping*, ma esula da questo lavoro approfondire questi particolari. Basti dire che nei MEMS (non solo negli accelerometri ma anche nei giroscopi), durante la progettazione,

è tenuta in considerazione la componente smorzante. Nella Figura 3a, m , b e k indicano rispettivamente, la massa, il coefficiente di smorzamento e la costante elastica. Descriviamo il sistema nella Figura 3a, per cui vale la seguente equazione:

$$f(t) = f_m(t) + f_b(t) + f_k(t) \quad (1.1)$$

con $f(t)$ forza esterna applicata al sistema, che equivale a tre componenti: $f_m(t)$ forza inerziale; $f_k(t)$ forza elastica; $f_b(t)$ forza viscosa. Scriviamo la (1.1) esprimendone i termini in rapporto alla velocità e tenendo conto del tipo di forze in gioco.

$$f(t) = m \frac{d\dot{x}(t)}{dt} + b\dot{x}(t) + k \int \dot{x}(t) dt \quad (1.2)$$

La trasformata di Laplace consente di fornire una rappresentazione nel piano s , dei termini che compaiono in (1.2). Facendo riferimento all'analogia elettromeccanica, si ha che:

$$\begin{aligned} Z_m &= sm \\ Z_b &= b \\ Z_k &= \frac{k}{s} \end{aligned} \quad (1.3)$$

dove Z_m , Z_b e Z_k sono le impedenze meccaniche degli elementi che compongono il sistema. Sostituendo in (1.2) le (1.3), abbiamo la seguente equazione:

$$F(s) = \left(sm + b + \frac{k}{s} \right) \dot{X}(s)$$

dove $s = \sigma + i\omega$, mentre $F(s)$ e $\dot{X}(s)$ sono le Trasformate di Laplace di $f(t)$ e $\dot{x}(t)$. La funzione di trasferimento del sistema è quindi

$$\frac{\dot{X}(s)}{F(s)} = \frac{1}{sm + b + \frac{k}{s}} = \frac{s}{s^2m + sb + k} \quad (1.4)$$

La (1.4) presenta uno zero in $s=0$, a indicare che in condizioni statiche (quando è solo la forza di gravità ad agire) il sistema raggiunge una posizione di equilibrio, dipendente dall'orientamento

rispetto alla direzione del raggio terrestre, e la velocità della massa inerziale è nulla.

La funzione di trasferimento possiede anche due poli in corrispondenza dei valori

$$s_{1,2} = -\frac{b}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

$$= -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

dove

$$\alpha = \frac{b}{2m}$$

e

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

sono, rispettivamente, la costante di smorzamento e la frequenza di risonanza dell'oscillatore non smorzato. Se analizziamo il comportamento del sistema in rapporto allo spostamento della massa inerziale, per la (1.4) possiamo scrivere

$$\dot{X}(s) = sX(s) = \frac{sF(s)}{s^2m + sb + k} \quad (1.5)$$

$$\Rightarrow X(s) = \frac{F(s)}{s^2m + sb + k}$$

Durante la fase di progettazione è importante far sì che la frequenza di risonanza del sistema sia molto superiore alla massima frequenza che si vuole poter misurare. Quando ciò accade siamo nella condizione di quasi staticità, nella quale la risposta del sensore alle sollecitazioni esterne non presenta rilevanti ritardi o attenuazioni. Sotto questa condizione, possiamo riscrivere la (1.5) nella seguente forma

$$X(s) = \frac{F(s)}{k} \quad (1.6)$$

dalla quale si può ricavare un'importante relazione che lega lo spostamento, la frequenza di risonanza e l'accelerazione.

$$x = \frac{a}{\omega_0^2} \quad (1.7)$$

La (1.7) evidenzia un importante vincolo per la fase progettuale di un accelerometro: aumentando la frequenza di risonanza miglioriamo la reattività, ma riduciamo l'entità degli spostamenti, rendendoli quindi più difficili da misurare. Questo vuol dire che la sensibilità del sensore è inversamente proporzionale alla larghezza di banda.

Affinché l'accelerometro possa essere impiegato come trasduttore, il movimento della massa inerziale deve essere trasformato in un segnale di tensione. Questa conversione è principalmente attuata mediante circuiti basati su variazione resistiva o capacitiva: i primi sono costruiti in modo da misurare la variazione di resistenza derivante dallo stiramento dell'elemento elastico della struttura, dovuto agli spostamenti dell'equipaggio mobile; nei secondi l'elemento mobile e lo chassis del sensore costituiscono una serie di condensatori la cui distanza fra le armature cambia alla presenza di uno spostamento.

In questa tesi prendiamo in considerazione gli accelerometri MEMS a variazione capacitiva, perché quelli da noi utilizzati rientrano in questa categoria. I primi comparvero sul finire degli anni '80, imponendosi sui sensori a variazione resistiva, rispetto ai quali hanno diversi vantaggi, fra cui: una calibrazione più semplice; una maggiore stabilità rispetto alla temperatura; prestazioni superiori per quanto riguarda accuratezza e linearità della misura. Un ulteriore vantaggio è il fatto che questo tipo di accelerometri è in grado di funzionare anche come attuatore: applicando una d.d.p. sulle armature, si crea infatti una forza elettrostatica che agisce sulla massa inerziale. In questo modo è molto semplice inserire un sistema di test all'interno del microsistema, che consenta di verificare il corretto funzionamento del MEMS. Inoltre, integrando opportuni elementi elettronici, è possibile far funzionare i sensori in configurazione closed-loop, e quindi, applicando alla massa inerziale una forza per compensare quella esterna agente sul sistema. Come risultato, si riduce l'entità dello

spostamento dell'equipaggio mobile aumentando così la linearità, diminuendo il rumore e migliorando la risposta dinamica rispetto al funzionamento open-loop, nel quale non è presente alcun condizionamento sul movimento della massa inerziale.

Nella Figura 4 è illustrato uno schema semplificato del funzionamento di un accelerometro a variazione capacitiva, nella quale si vede che la misura dello spostamento della massa inerziale è affidata a un condensatore differenziale.

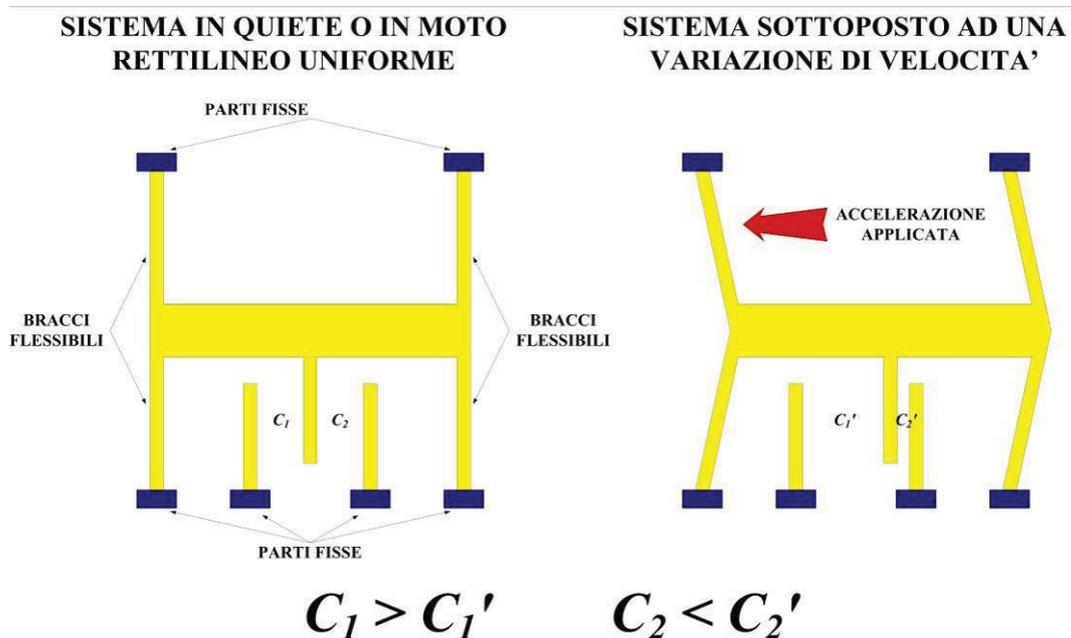


Figura 4: Schema semplificato di un condensatore differenziale che misura il movimento della massa inerziale.

Quando una forza esterna agente sul sistema causa l'allontanamento dalla posizione di equilibrio, la superficie dell'elemento mobile (che costituisce un'armatura del condensatore) si avvicina a una delle armature adiacenti e conseguentemente si allontana dall'altra. Se in condizione di equilibrio i due condensatori hanno capacità C_1 e C_2 uguali, quando il sistema è perturbato, una delle due capacità aumenta a scapito dell'altra. Il sistema in Figura 4 è illustrato, sotto forma di circuito elettrico nella Figura 5, dove, V_{DD} è la tensione di alimentazione del sensore, $V_{DD}/2 + \Delta V_{out}$ è la tensione in uscita e C_1 , C_2 sono i due condensatori. Si ha che

$$\Delta V_{out} = -\frac{V_{DD}}{2} + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot V_{DD} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{V_{DD}}{2} \quad (1.8)$$

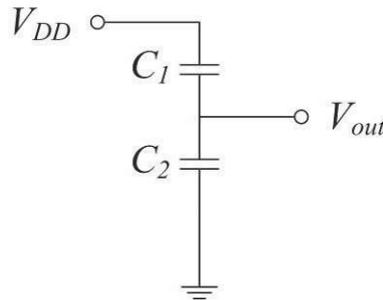


Figura 5: Schema elettrico del condensatore differenziale.

Se supponiamo che l'area delle armature dei condensatori sia uguale, allora, abbiamo che

$$C_1 \propto \frac{1}{h_1} \quad \text{e} \quad C_2 \propto \frac{1}{h_2}$$

dove h_1 e h_2 sono le distanze fra le armature nei due condensatori. Sostituendo nella (1.8), questa diventa

$$\Delta V_{out} = \frac{h_2 - h_1}{h_1 + h_2} \cdot \frac{V_{DD}}{2} = \frac{V_{DD}}{h_0} \cdot \delta h$$

dove, $\delta h = (h_2 - h_1)/2$ equivale allo spostamento dalla posizione di zero, e $h_0 = h_1 + h_2$ è la somma delle distanze fra le armature dei condensatori. Si nota che lo spostamento è proporzionale alla variazione della tensione in uscita e, in assenza di forze esterne agenti sul sistema, tale variazione è nulla.

Il metodo descritto per misurare la variazione capacitiva è solo una di una serie di possibilità la cui trattazione esula da questo lavoro, ma può essere approfondita in (Senturia, 2001). È tuttavia importante evidenziare che alcuni condensatori differenziali si basano sulla variazione dell'area delle armature, invece che su cambiamenti nella loro distanza.

Esistono diverse possibili configurazioni per la struttura di un condensatore, tra cui, le più comuni sono rappresentate nella Figura 6:

- (a) Struttura comunemente impiegata per il rilevamento delle accelerazioni sul piano (x, y) del sensore. Lo schema mostra

l'elemento di base del condensatore, che, all'interno del MEMS, è replicato per realizzare strutture "a pettine", come quelle in Figura 7. Questo approccio è necessario per ottenere superfici delle armature sufficientemente estese. Le tecniche di *surface micromachining* sono particolarmente adatte per realizzare questo tipo di configurazione;

- (b) Questa soluzione è adottata per rilevare accelerazioni lungo l'asse z del sensore. In tal caso la geometria del microsistema consente più facilmente di realizzare singole superfici, invece di strutture "a pettine";
- (c) Esempio di condensatore basato sulla variazione di area. Quando l'elemento mobile si muove verso destra o sinistra, l'area dei condensatori C_1 e C_2 cambia di conseguenza, per cui mentre una capacità aumenta, l'altra diminuisce.

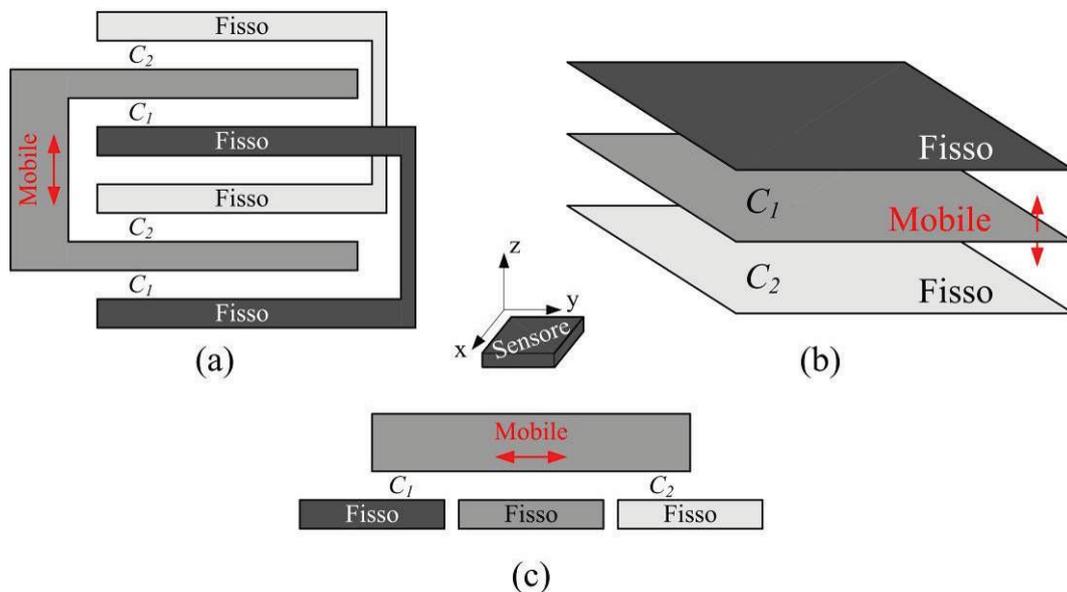


Figura 6: Alcune configurazioni utilizzate per realizzare condensatori differenziali.

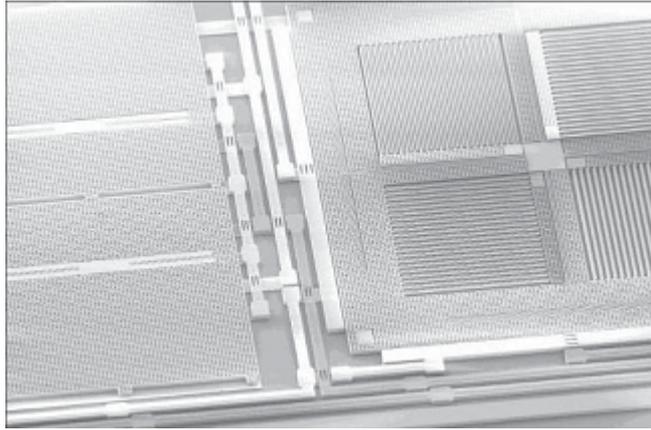


Figura 7: Esempio di struttura all'interno di un MEMS.

(fonte: <http://www.stmicroelectronics.com>, Vigna B., *12 breakout mems smart-sensors*, 2009)

Negli accelerometri MEMS, come abbiamo visto, ci sono parti meccaniche dedicate al rilevamento dell'accelerazione ed elementi elettronici che permettono di trasformarla in una tensione. Fermo restando che le tecniche utilizzate per compiere tali operazioni possono variare secondo le esigenze o le filosofie costruttive, in genere queste due fasi sono comuni a tutti i sensori, mentre le successive variano in funzione del tipo di output richiesto. Un accelerometro analogico ha uscite in tensione che devono essere acquisite tramite un convertitore A/D, mentre un MEMS digitale necessita l'interfacciamento tramite SPI (Serial Peripheral Interface) oppure I²C (Inter Integrated Circuit), entrambi protocolli di comunicazione seriale.

A prescindere dal fatto che l'output del microsistema sia analogico o digitale, esso ha una rumorosità complessiva che è la somma dei contributi provenienti da ciascun elemento che lo compone. In genere il livello di rumore complessivo è indicato in unità di $g/\sqrt{\text{Hz}}$, dove g è l'accelerazione di gravità. Possiamo individuare e classificare alcuni tipi di rumore, come segue:

- Rumore termico – trae origine dagli urti dei portatori di carica fra loro e con il reticolo del mezzo in cui si muovono. Nel caso di un resistore lo spettro del rumore è bianco. Per un condensatore invece è proporzionale a $\sqrt{k_B T/C}$, dove k_B è la costante di Boltzmann, T è la temperatura e C è la capacità del

condensatore. Si nota che l'entità del rumore aumenta al diminuire di C . Quindi, a una maggiore miniaturizzazione corrisponde un rumore più elevato;

- Flicker noise – si osserva alla presenza di diodi e FET (Field Effect Transistor), per cui è molto diffuso nella strumentazione elettronica. La sua ampiezza dipende dalla corrente continua nel circuito e lo spettro ha un andamento di tipo $1/f$, per cui è importante alle basse frequenze. Per una trattazione dettagliata si veda (Korvink, 2005);
- Brownian motion noise – è dovuto al moto Browniano e all'interazione fra la massa inerziale e il fluido in cui è immersa. L'elemento mobile oscilla attorno alla posizione di equilibrio e quindi possiamo considerare questo rumore come una forza che agisce sulla massa inerziale dell'accelerometro, provocando in questo modo la lettura di spostamenti fittizi.

Se consideriamo i MEMS in generale, sono coinvolti anche altri tipi di rumore, legati al principio di funzionamento degli specifici sistemi. Ciò che accomuna tutti i microsistemi è lo stretto legame fra miniaturizzazione e aumento del rumore intrinseco, poiché al diminuire delle dimensioni, acquisisce maggiore influenza l'effetto dell'agitazione termica.

Per la realizzazione di questo progetto sono state eseguite ricerche fra i sensori presenti in commercio, al fine di individuare il più adatto al nostro scopo. I principali parametri presi in considerazione per confrontare i vari sensori sono i seguenti:

- Sensibilità;
- Variazione della sensibilità in funzione della temperatura;
- Variazione dello zero in funzione della temperatura;
- Temperature d'esercizio;
- Rumorosità.

La nostra scelta è ricaduta sul sensore LIS3L02AL, prodotto da ST Microelectronics. Si tratta di un accelerometro a triassiale a variazione

capacitiva, dotato di output analogici. Nella Figura 8 è riportato lo schema a blocchi del microsistema.

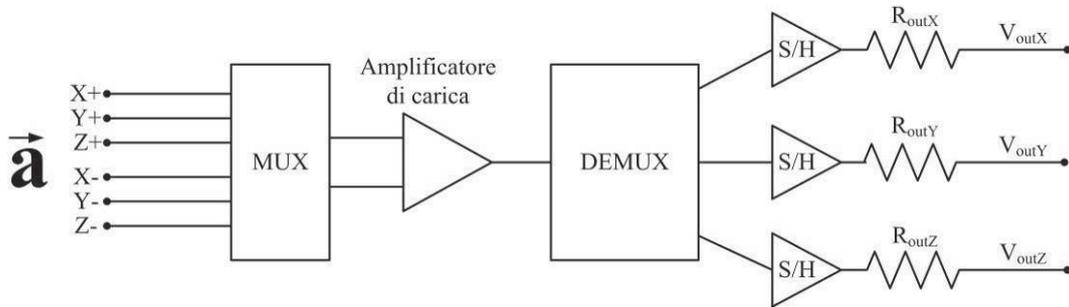


Figura 8: Diagramma a blocchi dell'accelerometro LIS3L02AL.

In questo MEMS, la massa inerziale è realizzata tramite tecniche di *surface micromachining*. I valori delle capacità nei condensatori con l'elemento mobile nella posizione di riposo sono di pochi pF. La massima variazione capacitiva alla presenza di accelerazione è di circa 100fF. All'interno del MEMS i segnali sono mantenuti in configurazione differenziale, per ridurre al minimo le interferenze esterne, possibili fonti di rumore. Un multiplexer (MUX) raccoglie i segnali e li invia a un amplificatore di carica capacitivo, che implementa un sistema CDS (Correlated Double Sampling) (Senturia, 2001). Questo stadio ha il compito di rimuovere l'offset del segnale e il flicker noise. Infine, il segnale è indirizzato a un demultiplexer (DEMUX), che lo separa nei tre canali single ended corrispondenti agli assi dell'accelerometro. Ciascuno di questi segnali è inviato a un sample&hold e quindi collegato all'output esterno.

Il sensore è raziometrico, per cui, il suo zero e la sensibilità dipendono dalla tensione di alimentazione V_{DD} . Se l'accelerometro è alimentato con una tensione di 3.3V, l'output in assenza di forze agenti su un determinato asse è dato da

$$V_{out-0g} = V_{DD}/2 = 1.65V$$

Tale valore è indicato come livello di zero: se $V_{out} > V_{DD}/2$, allora una forza agisce su quell'asse, nel verso positivo; se $V_{out} < V_{DD}/2$, allora la forza agisce nel verso negativo. Nella Figura 9, si mostra come varia

l'output del sensore in funzione del suo orientamento, data una tensione d'alimentazione di 3.3V.

L'accelerometro può funzionare con due valori diversi per il fondo scala: tramite un selettore è possibile impostarlo fra $\pm 2g$, oppure fra $\pm 6g$. Nel nostro caso, dovendo impiegare questi sensori come inclinometri e avendo la necessità di fruire della massima sensibilità, il fondo scale è sempre impostato nel primo modo ($\pm 2g$). La sensibilità è quindi data da:

$$S_{\pm 2g} = \frac{V_{DD}}{5} = 0.66 \frac{V}{g}$$

con una risoluzione massima dichiarata di 0.5 mg. La tensione di alimentazione deve essere stabilizzata al meglio, per via della natura raziometrica delle misure con sensori capacitivi. Anche la temperatura, seppure in misura minore, ha effetto sull'output del sensore. Tale dipendenza è trascurabile per quanto riguarda la sensibilità ($\pm 0.01\%/^{\circ}C$), mentre assume una maggiore importanza quando si considera il livello di zero.

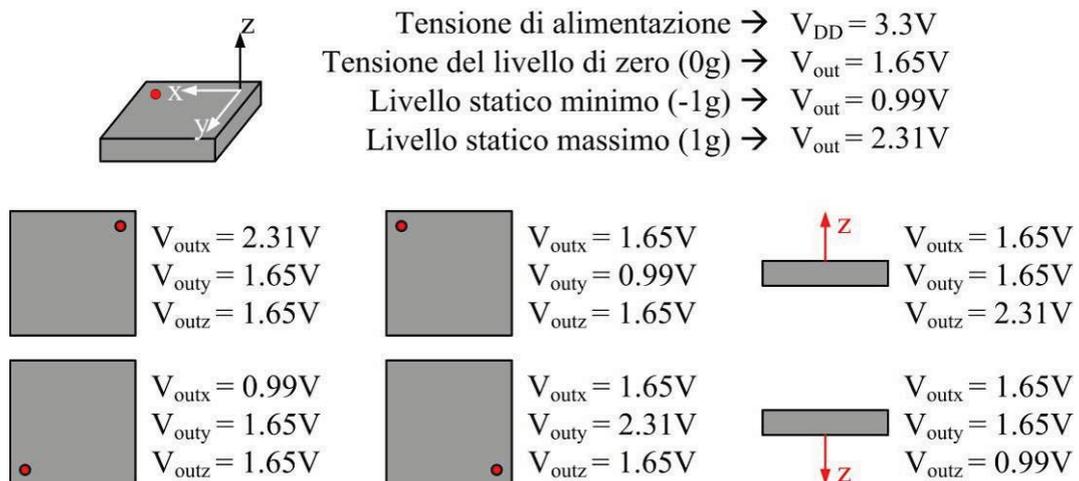


Figura 9: Illustrazione che mostra come varia la tensione di uscita al variare dell'orientamento del sensore, con una tensione di alimentazione di 3.3 V.

Il produttore fornisce i dati sulla variazione del livello di zero solamente in termini statistici. Per raggiungere la massima stabilità della misura alla presenza di variazioni di temperatura non

trascurabili, è quindi necessario ricavare una curva di correzione per la deriva termica. Quest'argomento è preso in considerazione nel secondo capitolo di questa tesi.

Tutti e tre gli assi dell'accelerometro hanno frequenza di risonanza pari a 1.5 KHz. La banda passante del sensore può però essere limitata, aggiungendo dei condensatori collegati in parallelo all'uscita di ciascun canale. Poiché l'impedenza in uscita dall'accelerometro è di circa 110 K Ω (con una tolleranza del 20%), aggiungendo un condensatore, si ottiene un filtro passa basso, che può essere utile per la riduzione del rumore e per evitare il fenomeno dell'*aliasing* in fase di conversione analogico-digitale.

La frequenza di taglio f_t del filtro è data dalla seguente relazione:

$$f_t = \frac{1}{2\pi \cdot R_{out} \cdot C}$$

dove R_{out} è l'impedenza d'uscita del sensore e C è il valore del condensatore da collocare all'uscita. Nel nostro caso, dovendo utilizzare i trasduttori come inclinometri, si è scelto di usare condensatori con $C = 1.5 \mu\text{F}$, ottenendo quindi una frequenza di taglio pari a 1 Hz.

La densità spettrale del rumore è di soli 50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Considerando che il sistema di misura deve funzionare da inclinometro, quindi misurando sui tre assi le componenti della forza di gravità, tale valore è più che appropriato e non influisce sulla sensibilità della misura.

L'integrità meccanica ed elettrica del trasduttore possono essere verificate grazie alla funzione di test: una forza elettrostatica è applicata alla massa inerziale, modificando l'output del sensore. Essendo nota l'entità della forza, lo è anche la differenza indotta nell'output. Se la variazione corrisponde, il sensore funziona correttamente.

Una delle caratteristiche che rende questi accelerometri adatti alla realizzazione di un sistema di monitoraggio fisso, è il sistema interno di calibrazione. In ciascun sensore è presente una memoria non

volatile in cui sono memorizzati i parametri di calibrazione del sistema. Quando il sensore si accende, avvengono la lettura dei dati e la calibrazione del trasduttore. In questo modo l'accelerometro non deve mai essere rimosso dalla posizione per essere calibrato. Le caratteristiche elettro-meccaniche rimangono pressoché costanti per tutta la vita del sensore. Gli strumenti tradizionali invece non hanno questa qualità e devono essere periodicamente calibrati.

1.3. Hardware e software di acquisizione e tele-gestione

Gli elementi meccanici del sistema sono costituiti dagli *aghi* di cui si è parlato in precedenza (cfr. Figura 2). Ognuno di essi è costituito da una serie di tubi d'acciaio inox di diametro 43 mm e lunghezza 2 m, collegati fra loro tramite un giunto cardanico, avente diametro 68 mm. A ciascun segmento di questa struttura è fissato un inclinometro. Questo, è connesso in serie ai sensori che corrispondono agli altri segmenti dell'*ago*, tramite un cavo flat a 4 poli. Nella Figura 10 è illustrato lo spaccato di uno dei tubi che costituiscono l'*ago*: si vede un estremo del tubo, al quale si collega il giunto cardanico (non incluso nello schema), e l'involucro di PVC che racchiude l'inclinometro. Il contenitore è fissato al tubo tramite una vite e, agli estremi, ha dei fori che servono al passaggio del cavo di collegamento dei sensori. Per evitare l'infiltrazione d'acqua, i contenitori sono collegati fra loro tramite un tubo in PVC, che è saldato con uno specifico collante. Gli elementi elettronici che costituiscono l'inclinometro sono protetti da un involucro in PVC. Nella Figura 11 si vede:

- L'involucro con inclinometro all'interno. Avendo un foro d'ingresso e uno d'uscita per il cavo, è utilizzato per ogni sensore, escluso l'ultimo;
- Il contenitore con il solo foro d'ingresso, da utilizzare per l'ultimo sensore;
- Il tappo per la chiusura.

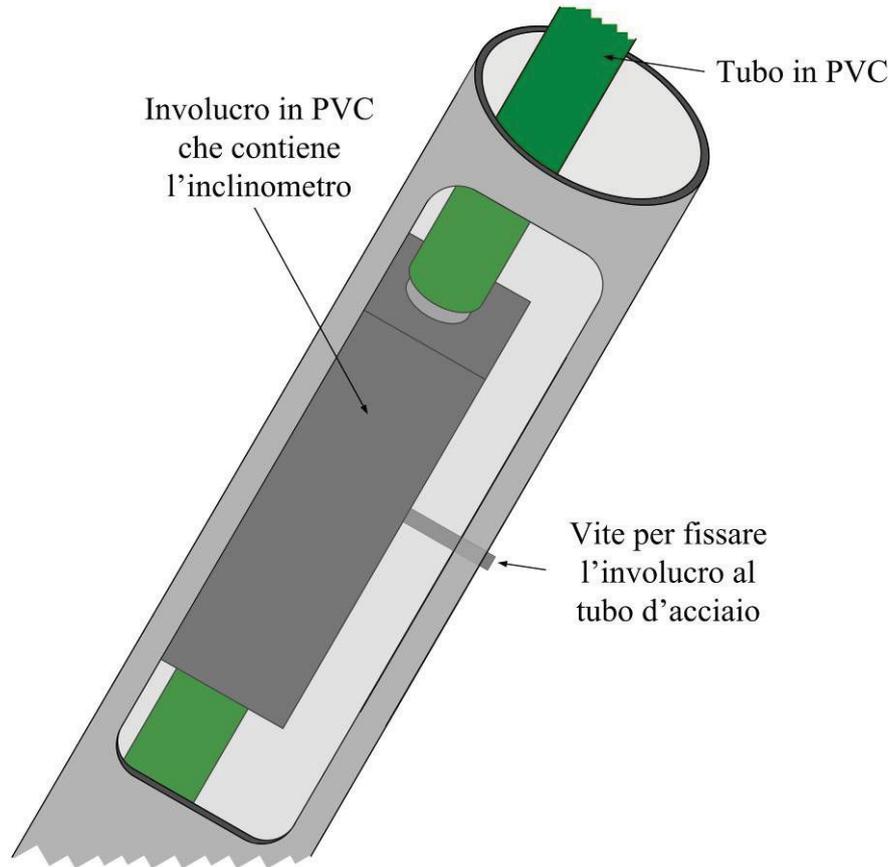


Figura 10: Particolare di una porzione di tubo, sezionata in modo da mostrare l'involucro dell'inclinometro, la vite che lo fissa alla struttura e il tubo di PVC che protegge il cavo di comunicazione dei dati.



Figura 11: Foto che ritraggono: (a) un involucro con all'interno un inclinometro; (b) l'involucro che viene utilizzato alla fine della catena di sensori; (c) il tappo che serve a sigillare il contenitore.

La struttura metallica funge da esoscheletro per i sensori e consente di rendere misurabili i movimenti del terreno. Grazie all'utilizzo dei giunti cardanici, infatti, è mantenuta la direzionalità del movimento e quindi, la deformazione dell'*ago* riflette lo spostamento locale del terreno. L'accuratezza con cui è possibile ricostruire il profilo del fronte franoso dipende principalmente dalla lunghezza dei segmenti che compongono l'*ago*. Minore è tale lunghezza, maggiore sarà la risoluzione disponibile per ricostruire la forma della superficie di scorrimento.

Per garantire il funzionamento di questo metodo di misura, occorre perforare il suolo fino a raggiungere il terreno fermo, sotto la frana: in questo modo è possibile rendere solidale l'ultimo elemento dell'*ago* con questa parte del terreno, al fine di avere un punto di riferimento immobile. In mancanza di tale punto, il sistema di misura è in grado di indicare solamente gli spostamenti relativi fra gli strati all'interno della frana e non il movimento di questa rispetto al terreno stabile.

1.3.1. Elettronica del sistema

Per realizzare questo sistema di monitoraggio è stato necessario progettare circuiti elettronici dedicati, da integrare con la parte meccanica descritta sopra. In questo sottoparagrafo è descritta l'elettronica presente nel *blocco di misura* (cfr. Figura 1), già introdotto nel paragrafo 1.1.

L'alimentazione del sistema è fornita da una batteria da 12 V in grado di erogare 100 Ah. In assenza di un pannello solare per la ricarica, essa può mantenere funzionante per circa tre mesi un sistema costituito da 30 inclinometri. Il maggiore responsabile del consumo della batteria è il modem, poiché deve rimanere sempre in stand-by, necessitando costantemente di 20 mA. Esso si occupa del trasferimento dei dati via GPRS al *blocco di gestione* (cfr. par. 1.1), ed è dotato di una porta seriale RS-232. Questa è collegata alla scheda di alimentazione del sistema, cui fa riferimento la Figura 12.

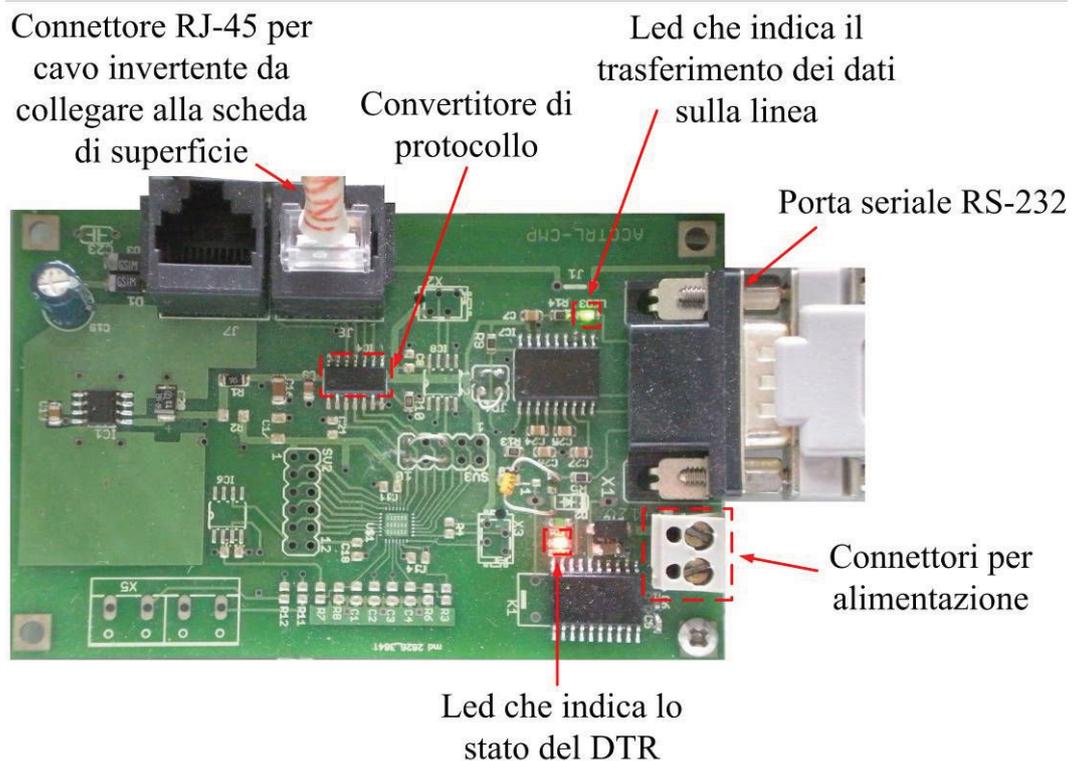


Figura 12: Foto della scheda di alimentazione del sistema, che è collegata alla batteria e al modem.

Tale scheda è collegata alla batteria e rimane spenta fino all'arrivo di una chiamata. Quando ciò avviene, il modem cambia lo stato del DTR (Data Terminal Ready) della linea RS-232, e la scheda si attiva. Il passaggio di stato del sistema da passivo ad attivo è indicato dall'accensione del led rosso, visibile nella Figura 12.

Il compito della scheda di alimentazione è accendere tutto il sistema (fino a 256 aghi) e interfacciarlo con il modem, fungendo quindi anche da periferica di input/output del sistema. I dati ricevuti dal modem sono inviati al convertitore di protocollo che li formatta secondo lo standard RS-485.

L'output di questa scheda è costituito da un connettore RJ-45, al quale va collegato un cavo invertente su cui sono trasmessi sia i dati, sia l'alimentazione a 12 V. L'altro capo del cavo è connesso alla scheda di superficie, visibile nella Figura 13.

Queste schede sono collocate in prossimità dell'ago che devono pilotare, protette in opportuni contenitori impermeabili. Esse sono

progettate per essere collegate in serie, permettendo così di realizzare un sistema di monitoraggio costituito da più punti di misura.

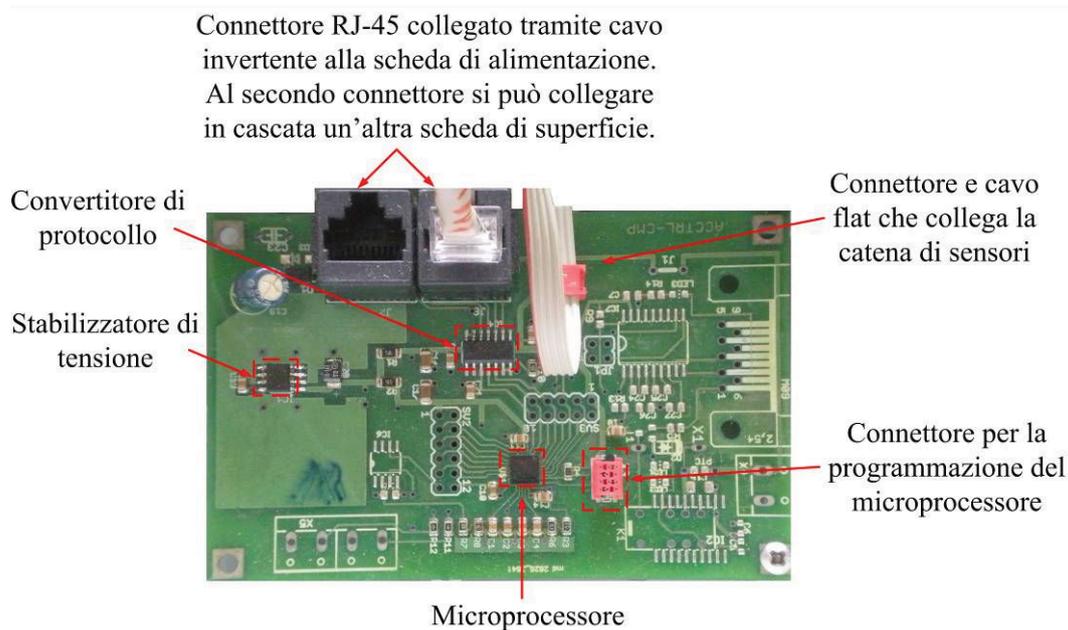


Figura 13: Foto della scheda di superficie, cui è collegata la scheda di alimentazione e gli accelerometri di un ago. Inoltre può essere collegata ad altre schede dello stesso tipo.

Come si vede dalla foto nella Figura 13, sono presenti due connettori RJ-45: uno per l'ingresso dei dati e dell'alimentazione, l'altro per la loro uscita. La prima scheda della serie è necessariamente collegata al circuito di alimentazione tramite cavo a 8 poli invertente, mentre le altre sono connesse con cavo non invertente.

La prima operazione effettuata dalla scheda di superficie è la stabilizzazione della tensione in ingresso che è ridotta da 12 V a 3.3 V. Questa operazione è necessaria perché, sia il microprocessore presente su questo circuito, sia gli inclinometri devono essere alimentati con una tensione di 3.3 V.

Il C8051F353, microprocessore della Silicon Labs, è dotato di input/output digitali, di un convertitore ADC con 8 canali a 16 bit single-ended e di un misuratore di temperatura. I dati in input alla scheda sono convertiti in formato RS-232 e inviati al micro, che li indirizza ai sensori, dopo averli convertiti in un formato seriale non standard. Questi eseguono l'istruzione ricevuta e rispondono al

microprocessore, che impacchetta le informazioni e le invia al modem.

Nella Figura 13 si può vedere che, collegato alla scheda, c'è il cavo flat a 4 poli, così assegnati:

- GND – ground del segnale;
- TD – Trasmissione dati;
- RD – Ricezione dati;
- V_{DD} – Tensione di alimentazione a 3.3 V.

Tale cavo trasferisce i dati e l'alimentazione agli inclinometri collegati in serie. Uno di questi è riportato in foto nella Figura 14, assieme ad un riferimento che indica l'orientamento degli assi del MEMS.

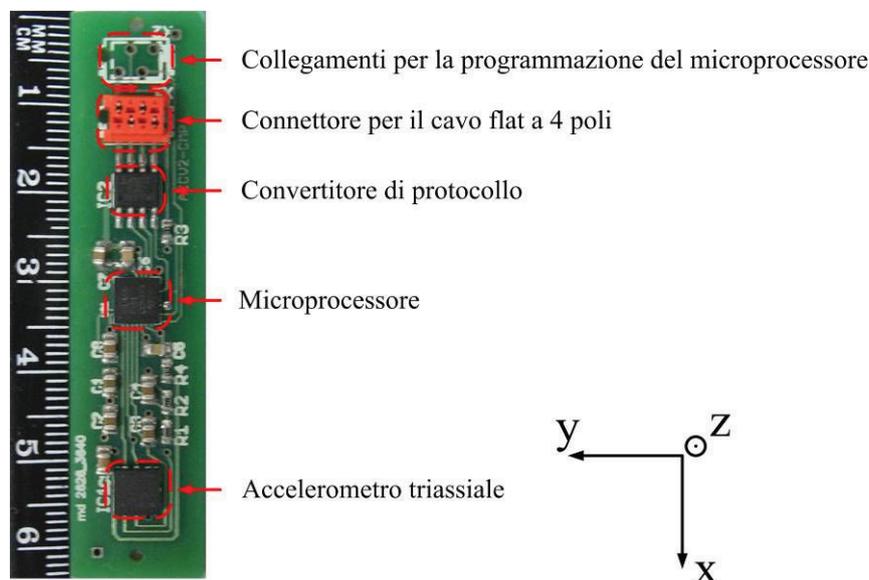


Figura 14: Foto di un inclinometro, con riferimento all'orientamento degli assi.

Quando il segnale giunge al sensore, è convertito dall'apposito integrato secondo lo standard RS-232 e inviato al microprocessore. Se è stata richiesta una lettura dell'inclinazione, esso acquisisce:

- La tensione di alimentazione presa da un partitore al 50%, in modo da rilevare direttamente $V_{DD}/2$. L'acquisizione di questo segnale è indispensabile proprio per la natura raziometrica del sensore;
- I segnali provenienti dai tre output dell'accelerometro, dopo il filtraggio con frequenza di taglio a 1 Hz;

- La temperatura fornita dal sensore interno al microprocessore.

I dati raccolti sono memorizzati internamente al microprocessore, in attesa di un successivo comando, che ne disponga l'invio alla scheda di superficie, e quindi verso il modem.

Impiegando un canale digitale del microprocessore, è possibile avviare la funzione di autotest del MEMS, che quindi fornisce i valori indicativi delle componenti dell'accelerazione di gravità sui tre assi, sommati al contributo della forza elettrostatica applicata per il test.

1.3.2. Software di basso livello e funzioni di base del sistema

I microprocessori impiegati hanno un proprio linguaggio di programmazione che costituisce il software di basso livello del sistema. Esso gestisce le operazioni di base dell'apparato e quindi l'acquisizione e la formattazione dei dati raccolti. Inoltre, si occupa dell'assegnazione degli indirizzi che identificano i microprocessori del sistema. In questo modo, ogni scheda di superficie ha un "nome" che la distingue dalle altre, così come ogni inclinometro all'interno della catena di sensori di un *blocco di acquisizione* ha una propria etichetta identificativa. Nel prototipo installato sulla frana di Lezza Nuova, i 5 *blocchi di misura* sono identificati dalle lettere U, V, Z, X, Y. Ai 6 sensori di ciascun *ago* sono invece attribuite le lettere dalla A, per il sensore più superficiale, alla F, per quello a maggiore profondità, che inoltre costituisce il riferimento per il sistema.

Esiste un set d'istruzioni che possono essere impartite tramite messaggi seriali dal *blocco di gestione* e inviati ad ogni scheda di superficie che fa parte del sistema. All'accensione dell'apparato di monitoraggio (quando il modem abilita il DTR), il programma esegue una calibrazione iniziale dell'ADC e un'acquisizione, quindi si pone in attesa di un carattere dalla seriale RS-232 settata per default a 1200 bps. I comandi previsti sono i seguenti, all'interno delle parentesi:

- (*) provoca l'esecuzione di una subroutine di Test della scheda;
- (%) corrisponde all'esecuzione di un'acquisizione;

- (#) effettua l'esecuzione di una calibrazione e successiva acquisizione. La calibrazione avviene tramite i dati memorizzati nel MEMS dal produttore;
- (") induce un test dei sensori con acquisizione.

Quando una di queste istruzioni giunge alle schede di superficie, queste la inviano ai microprocessori degli inclinometri. Inoltre, acquisiscono e memorizzano i seguenti dati:

- Tensione di alimentazione della scheda di superficie;
- Tensione stabilizzata, che alimenta gli inclinometri;
- Temperatura.

I microprocessori degli inclinometri, che ricevono l'istruzione dalle schede di superficie, acquisiscono i dati come descritto nel sottoparagrafo precedente e li memorizzano.

È importante evidenziare che i comandi sono eseguiti contemporaneamente da tutti i microprocessori, per cui, dopo l'esecuzione, il sistema ha in memoria i dati acquisiti. Per leggerli, occorre inviare uno specifico comando, che corrisponde al carattere identificativo della scheda di superficie. Se per esempio vogliamo ricevere i dati riguardanti il primo *ago* del sistema prototipo, dobbiamo inviare la lettera "U". Tale comando è inviato a tutte le schede di superficie, ma provoca esclusivamente la risposta del microprocessore indicizzato con quella lettera. Esso raccoglie i dati da tutti gli inclinometri, e li invia al *blocco di gestione*. Per ottenere i dati delle altre schede superficiali, dobbiamo inviare il carattere identificativo di ciascuna. La lettura dei dati quindi, non è eseguita in maniera sincrona, ma raccogliendo le informazioni dei singoli *blocchi di misura* separatamente.

I dati riguardanti un *ago* sono costituiti da 100 caratteri in codice ASCII, dei quali, 16 riguardano la scheda di superficie e 84 (14 x 6) fanno riferimento agli inclinometri. Nelle tabelle che seguono, è indicata la struttura delle stringhe di dati, mettendo in relazione la posizione dei caratteri al significato.

Caratteri	Informazione contenuta
1,16	Nome del <i>blocco di misura</i>
2	Parametro di controllo dell'istruzione
3,4	Tensione di alimentazione del <i>blocco di misura</i>
5,6	Tensione inviata agli inclinometri
7,8	Temperatura
9,10,11,12,13,14	Non assegnati
15	Parametro di controllo XOR

Tabella 1: Significato dei caratteri riguardanti il *blocco di misura*.

Caratteri	Informazione contenuta
1,14	Nome dell'inclinometro
2	Parametro di controllo dell'istruzione
3,4	Tensione in uscita asse x
5,6	Tensione in uscita asse y
7,8	Tensione in uscita asse z
9,10	Tensione di alimentazione
11,12	Temperatura
13	Parametro di controllo XOR

Tabella 2: Significato dei caratteri riguardanti gli inclinometri.

Occorre precisare che ciascun valore numerico, essendo stato acquisito a 16 bit, è rappresentato da due caratteri (2 byte).

Il parametro di controllo dell'istruzione serve a verificare la corretta esecuzione. Quando non ci sono errori, tale carattere coincide con quello dell'istruzione impartita (cfr. comandi eseguibili *, %, #, "). Se avviene un errore, il parametro di controllo può assumere uno dei seguenti valori (scritti fra parentesi):

- (!) quando si verifica un errore di calibrazione;
- (\$) se è presente un errore di conversione;
- (&) se si sono verificate entrambe le precedenti situazioni.

Nella Figura 15 è riportata una stringa d'esempio, suddivisa in base agli elementi cui fanno riferimento le sue parti (alcuni caratteri non sono stampabili).

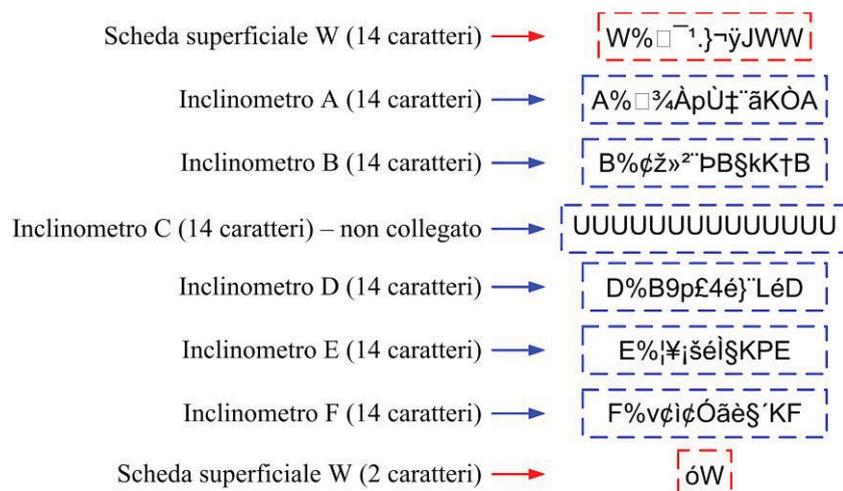


Figura 15: Esempio di stringa corrispondente ai dati acquisiti da un *blocco di misura* indicizzato con la lettera W, in seguito al comando (%).

Questo esempio si riferisce a una stringa memorizzata in seguito al comando di acquisizione (%). Si noti che la parte di stringa riguardante l'inclinometro identificato dal carattere "C" è costituita da sole lettere "U". La lettera "U" corrisponde ai seguenti valori ASCII: 85 per la notazione decimale; 01010101 per quella binaria. La scelta di questo carattere è motivata dal fatto che la sua forma digitale corrisponde al carattere NUL=0 (00000000 in forma binaria) che diventa 01010101 per inversione dei bit pari. Tale operazione è codificata dagli standard internazionali per la trasmissione dei dati. In questo caso, infatti, il sensore C non era collegato ed è stato quindi rappresentato da valori nulli.

Capitolo 2.

Elaborazione dei dati e taratura dei sensori

Questo capitolo descrive le prove che sono state eseguite su sensori e sistema di misura per definirne le caratteristiche, le prestazioni e stabilire le eventuali correzioni da apportare ai dati raccolti. Le operazioni d'interfacciamento dell'apparato di acquisizione dati e di analisi sono state realizzate in ambiente di sviluppo LabVIEW (National Instruments), utilizzando anche il software di gestione e analisi dati DIAdem (National Instruments).

Il primo argomento trattato riguarda l'elaborazione dei dati provenienti dagli inclinometri e la taratura del sistema. Si descrive la procedura di formattazione dei dati, che ha il compito di convertire i valori acquisiti e memorizzati dal microprocessore, in modo che essi siano congruenti con le grandezze fisiche che devono rappresentare.

In seguito sono descritte le caratteristiche dei sensori di temperatura integrati all'interno del microprocessore che fa parte della sonda inclinometrica.

È illustrata la procedura seguita per calibrare gli inclinometri: essa ha lo scopo di determinare le caratteristiche elettriche dei singoli sensori, poiché il produttore fornisce tali informazioni solo in termini statistici. L'ultima parte del capitolo è dedicata all'approfondimento delle caratteristiche raziometriche degli accelerometri LIS3L02AL. Il comportamento raziometrico determina una dipendenza del segnale in uscita dal sensore dalla sua tensione d'alimentazione: in questo paragrafo si descrive l'analisi effettuata per determinare in modo approfondito tale comportamento.

2.1. Taratura dei sensori

2.1.1. Formattazione e conversione dei dati raccolti

Come anticipato nel capitolo precedente, le uscite analogiche dell'accelerometro MEMS e la sua tensione di alimentazione sono acquisite dal microprocessore, che memorizza tali dati, assieme alla temperatura, e li comunica su richiesta al *blocco di gestione*.

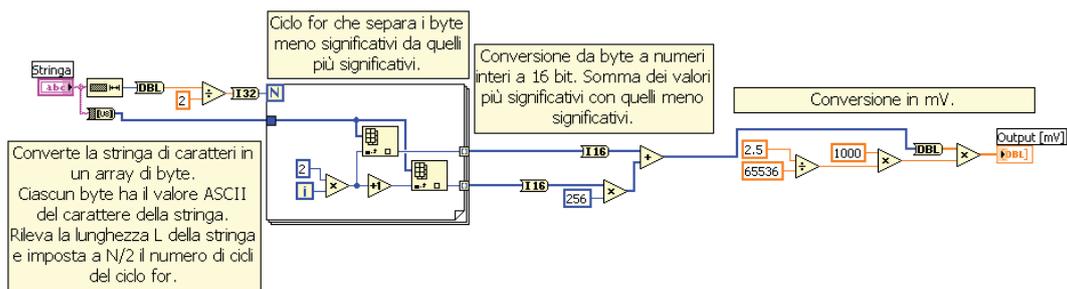


Figura 1: Immagine del diagramma a blocchi del codice LabVIEW utilizzato per convertire il codice ASCII in mV.

I dati sulle accelerazioni, sulla tensione di alimentazione e sulla temperatura, sono rappresentati da due byte, di cui il primo è il meno significativo. La prima operazione da compiere per rendere fruibili le informazioni contenute nella stringa, è la conversione dei caratteri ASCII in valori di tensione, che è eseguita tramite il codice LabVIEW visibile nella Figura 1.

Il VI¹ rappresentato nella Figura 1 compie le seguenti operazioni:

- Riceve in ingresso una stringa, di cui determina la lunghezza N e converte ogni suo carattere in un byte con il corrispondente valore numerico del codice ASCII;
- Tramite un ciclo FOR con $N/2$ cicli, separa i bytes meno significativi da quelli di maggior peso inserendoli in due array di dimensione $N/2$;
- Converte i byte in interi a 16 bit e li somma, dopo aver moltiplicato il byte più significativo per 256;
- Converte il valore a 16 bit del livello acquisito “ L ” in una tensione, espressa in mV, tramite la formula:

$$V = L \cdot \frac{V_{rif} \left[\frac{V}{256} \right]}{2^n} \cdot 1000 \frac{[mV]}{[V]} \quad (2.1)$$

dove V e L sono i valori campionati dal convertitore ADC, il primo espresso in livelli interni, il secondo in mV. V_{rif} è la tensione interna di riferimento del convertitore, che equivale a 2.5 V, mentre n corrisponde al numero di bit ed è uguale a 16.

La conversione dei dati deve essere accompagnata da una loro scrematura, per separarli dai parametri d’indicizzazione e controllo presenti nella stringa. Al termine di queste due operazioni, nel caso dell’impianto prototipo installato sulla frana di Lezza Nuova, abbiamo a disposizione un insieme di dati costituito da 33 valori. I primi 3 riguardano la *scheda di superficie*, mentre i 30 rimanenti sono riferiti ai 6 inclinometri (5 valori per ciascuno). Nella tabella 1 si trova uno schema della rappresentazione dei dati.

¹ VI è l’acronimo di Virtual Instrument: termine utilizzato per identificare un programma realizzato in ambiente LabVIEW.

Nome	Valore d'esempio [mV]	
V_{al}	1072.744	} Dati della scheda di superficie
$V_{dd}/2$	1704.442	
V_{Tsup}	758.609	
⋮		
V_{*x}	944.003	} Dati di un inclinometro
V_{*y}	1600.467	
V_{*z}	1634.185	
$V_{dd*/2}$	1644.777	
V_{T*}	764.743	

(X 6)

Tabella 1: Esempio in cui sono riportati nomi e alcuni valori d'esempio, corrispondenti a un blocco di misura, dopo che i dati sono stati formattati e convertiti in mV. La prima struttura, composta da tre dati è riferita alla scheda di superficie, mentre la seconda griglia, che contiene 5 dati riguarda un singolo inclinometro e quindi si ripete 6 volte.

I nomi indicati nella tabella 1 hanno il seguente significato:

- V_{al} è la tensione di alimentazione della scheda di superficie. Poiché è acquisita da un partitore di tensione, il suo valore non è ancora definitivo, ma deve essere opportunamente scalato;
- $V_{dd}/2$ corrisponde a metà della tensione generata sulla scheda di superficie e utilizzata per alimentare gli inclinometri;
- V_{Tsup} è la temperatura, espressa della scheda di superficie;
- $V_{*#}$ sono i valori di accelerazione letti sui tre assi degli accelerometri, con “*” ad indicare il nome dell’accelerometro e “#” quello dell’asse;
- $V_{dd*/2}$ corrisponde a metà della tensione di alimentazione dell’accelerometro “*”;
- V_{T*} è la temperatura misurata dal microprocessore dell’inclinometro “*”.

I valori delle accelerazioni devono essere ulteriormente elaborati per ricavare le informazioni sull’inclinazione dei sensori. Questa operazione viene affrontata nel sottoparagrafo dedicato alla taratura dei sensori. Anche per le misure di temperatura sono necessari calcoli aggiuntivi, rimandati al seguito del capitolo.

Per ottenere il valore definitivo di V_{al} , si deve eseguire la seguente operazione, che porta a un valore espresso in V:

$$V_{al(scaled)} = \frac{V_{al} + 140}{100} \text{ [V]}$$

Questo dato, letto sul primo *blocco di misura* del sistema, indica la tensione della batteria che lo alimenta. I valori ricavati dai *blocchi* successivi sono invece interessanti per monitorare la caduta di tensione che avviene dopo ciascuno di essi e può indicare malfunzionamenti dovuti ad assorbimenti anomali di corrente.

2.1.2. Il sensore di temperatura

La temperatura costituisce un dato importante per ottenere delle misure d'inclinazione precise. La misura della temperatura è eseguita tramite un sensore collocato all'interno di ciascun microprocessore. Esso è costituito da due diodi con differenti proprietà termiche, collegati internamente al multiplexer del convertitore analogico-digitale del microprocessore. La curva di calibrazione per la misura di temperatura è illustrata nella Figura 2.

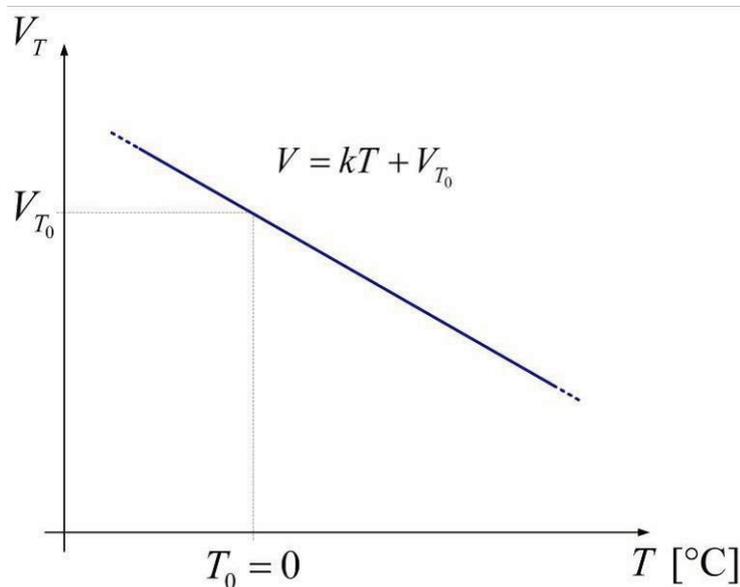


Figura 2: Grafico della funzione di trasferimento del sensore di temperatura.

Dall'equazione della retta raffigurata, si ottiene la relazione che permette di ricavare la temperatura dal valore in volt acquisito dal convertitore:

$$T = \frac{V_T - V_{T_0}}{k} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.2)$$

dove V_{T_0} è la tensione corrispondente alla temperatura di 0°C e k è il coefficiente angolare della retta.

Nella tabella 2 sono riportati i valori delle caratteristiche elettriche del sensore di temperatura.

Parametro	Valore	Unità di misura
Linearità	± 0.4	$^\circ\text{C}$
V_{T_0}	757	mV
Errore su V_{T_0}	± 1	mV
k	-1.73	mV/ $^\circ\text{C}$
Errore su k	± 6.6	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Tabella 2: Caratteristiche elettriche del sensore di temperatura per una tensione di alimentazione di 3.0 V e nell'intervallo di temperatura compreso fra -40 e 85°C .

La misura della temperatura è stata introdotta per fornire una correzione della deriva termica degli accelerometri, che si manifesta in un cambiamento del loro livello di zero e della sensibilità. Le variazioni dichiarate dal costruttore sono:

- $\pm 0.01 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ per la sensibilità;
- $\pm 0.5 \text{ mg}/^\circ\text{C}$ per il livello di zero².

Da questi dati appare evidente che, nel nostro campo operativo, con escursioni massime non superiori a 20°C , la temperatura ha un effetto trascurabile sulla sensibilità, mentre la variazione dell'offset deve essere tenuta in considerazione. Il problema della deriva termica è in parte mitigato dal fatto che gli inclinometri si trovino all'interno del terreno e quindi risentano in misura minore degli sbalzi di temperatura

² In questa tesi si utilizza spesso un'unità di misura legata all'ambito dei sensori inclinometrici. In questo settore l'accelerazione è comunemente indicata, per praticità, in unità di [g], dove $g \cong 9.81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

cui sarebbero sottoposti in superficie. Tuttavia, è importante valutare quest'aspetto se si vuole massimizzare la precisione del sistema.

Dalle prime acquisizioni effettuate con i sensori, è emersa una loro caratteristica molto importante: le misure eseguite hanno un'ottima ripetibilità e i sensori sono simili fra loro per quanto riguarda la sensibilità. Il coefficiente angolare k della retta che rappresenta la funzione di trasferimento dei sensori non varia in maniera rilevante sul campione utilizzato.

Nella Figura 3 si vede il grafico ottenuto dalla taratura dei sensori appartenenti ad uno stesso ago. La misura è stata eseguita utilizzando una camera termostatica, tramite la quale il sistema è stato stabilizzato a 4 temperature diverse. Ogni volta abbiamo misurato la temperatura con il nostro sistema e anche con una termocoppia, per avere un riscontro del valore indicato sui controlli del forno termostatico. Nel grafico sono riportati i punti misurati, con i relativi errori, e le corrispondenti rette ricavate per regressione lineare.

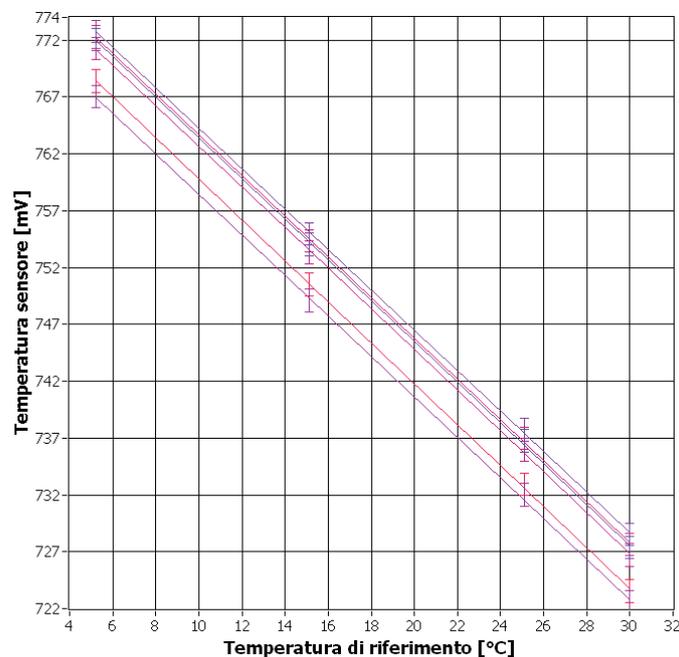


Figura 3: Grafico risultante dalla taratura dei sensori di un ago.

Da queste ultime è possibile ricavare i coefficienti k e V_{T_0} per ogni sensore.

È importante evidenziare che la taratura ha confermato l'omogeneità dei coefficienti angolari delle rette e la differenza fra i valori di k e V_{T_0} dichiarati dal costruttore e quelli da noi estrapolati. Nella Figura 4 si può vedere un grafico a istogrammi in cui sono riportati tali valori per i 30 sensori installati sul nostro sistema. L'intervallo di valori trovati è distante dai 757 mV indicati dal costruttore come tensione misurabile a 0 °C. Questa discrepanza è probabilmente dovuta al fatto che i valori nella tabella 2 si riferiscono a una tensione d'alimentazione di 3.0 V, mentre noi alimentiamo il microprocessore a 3.3 V.

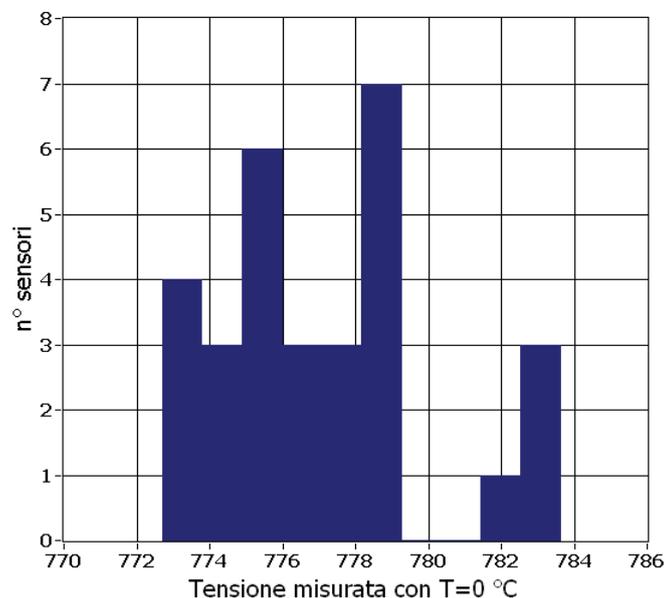


Figura 4: Istogramma in cui sono riportati i valori di V_{T_0} per ognuno dei 30 sensori di temperatura installati nel sistema.

Grazie a questi sensori possiamo dunque misurare le variazioni della temperatura per ogni inclinometro che fa parte del nostro sistema e quindi riusciamo a correggere la deriva termica che ha luogo per via della variazione del livello di zero dell'accelerometro MEMS.

Come per le altre caratteristiche, è necessario definire l'entità della deriva termica per ciascuno dei sensori; il produttore fornisce solamente indicazioni statistiche per questo dato.

Nel seguito di questo capitolo sarà mostrato un esempio di correzione della deriva termica per questi sensori.

2.1.3. Calibrazione degli inclinometri

I valori nella tabella 1, riferiti ai segnali di tensione sui tre assi degli accelerometri, tenendo conto anche della natura raziometrica dei sensori, possono essere trasformati in tre angoli α_x , α_y e α_z , definiti rispetto alla direzione dell'accelerazione di gravità \vec{g} . Analizziamo cosa accade ai segnali acquisiti dall'ADC. Per non appesantire la notazione, facciamo riferimento a un solo asse di un accelerometro, su cui agisce un'accelerazione a . Definiamo:

- A , grandezza da misurare;
- k , costante;
- b , attenuazione all'ingresso dell'ADC;
- $V_a = AkV_{DD}$, tensione in uscita dell'accelerometro, senza carico;
- $V = bV_a$, tensione in ingresso all'ADC;
- N , tensione in uscita dall'accelerometro, come acquisita;
- V_{DD} , tensione di alimentazione;
- N' , tensione di alimentazione, come acquisita;
- n , numero di bit.

Abbiamo che

$$N = \left(\frac{V}{V_{rif}} \right) 2^n \quad (2.3)$$

dove $V_{rif} = 2.5 \text{ V}$ corrisponde alla tensione di riferimento interna del microprocessore. Sostituendo V nella (2.3), tenendo conto delle definizioni sopra, si trova

$$N = \left(bAk \frac{V_{DD}}{V_{rif}} \right) 2^n$$

Ripetendo lo stesso ragionamento per la tensione di alimentazione V_{DD} , che è acquisita dal microprocessore, si ha:

$$N' = \left(\frac{1}{2} b \frac{V_{DD}}{V_{rif}} \right) 2^n$$

Per applicare la correzione raziometrica a N , dobbiamo dividerla per N' . Da questa operazione risulta la seguente uguaglianza:

$$\frac{N}{N'} = 2Ak \quad (2.4)$$

da cui si conclude che la correzione raziometrica rende il risultato indipendente dalla tensione di alimentazione V_{DD} , da quella di riferimento V_{rif} e da b , attenuazione all'ingresso dell'ADC.

Nel capitolo 1 sono stati descritti gli accelerometri MEMS impiegati per questo progetto, indicando fra le caratteristiche la loro natura raziometrica e i valori tipici della sensibilità e del punto di zero. Questi ultimi due parametri sono riportati nella tabella 3 tenendo conto anche della loro tolleranza.

Parametro	Valori (a 25°C)	Unità
Sensibilità	$\frac{V_{DD}}{5} - 10\% < \frac{V_{DD}}{5} < \frac{V_{DD}}{5} + 10\%$	$\frac{V}{g}$
Punto di zero	$\frac{V_{DD}}{2} - 6\% < \frac{V_{DD}}{2} < \frac{V_{DD}}{2} + 6\%$	mV

Tabella 3: Valori indicati dal costruttore per la sensibilità e per il punto di zero degli accelerometri.

Partendo dalle definizioni sopra indicate e considerando i valori della tabella 3, possiamo scrivere che

$$V_a = \frac{V_{DD}}{2} + \frac{V_{DD}}{5} \frac{a}{g} \quad (2.5)$$

dove a è l'accelerazione agente sull'asse dell'accelerometro e g è l'accelerazione di gravità. Da quest'ultima relazione e dalla (2.4) si trova che

$$\frac{N}{N'} = \frac{2V_a}{V_{DD}} = 1 + 0.4 \frac{a}{g} \quad (2.6)$$

da cui si ricava il rapporto fra le accelerazioni, in funzione dei valori acquisiti dal microprocessore,

$$\frac{a}{g} = 2.5 \left(\frac{N}{N'} - 1 \right)$$

e di conseguenza l'angolo cercato α è dato da

$$\alpha = \arcsin \left[2.5 \left(\frac{N}{N'} - 1 \right) \right] \quad (2.7)$$

Questa relazione può essere impiegata per trovare α_x , α_y e α_z , per qualsiasi inclinometro del sistema, a patto di inserire i valori di tensione corretti al posto di N e di N' . Facendo riferimento alla tabella 1, N deve essere sostituito con uno dei valori $V_{*#}$, mentre N' , con $V_{dd}*/2$.

Se prendiamo in considerazione anche le tolleranze riportate nella tabella 3, dobbiamo modificare l'equazione per ricavare l'angolo α . Definiamo dei parametri per inserire le tolleranze nei calcoli: s è il parametro per il punto di zero e t è il parametro che incide sulla sensibilità. Allora abbiamo che $0.94 < s < 1.06$ e $0.9 < t < 1.1$, per cui la (2.6) diventa

$$\frac{N}{N'} = s + 0.4t \frac{a}{g} \quad (2.8)$$

e quindi, se si considerano le tolleranze indicate, l'angolo cercato è

$$\alpha = \arcsin \left[2.5 \frac{\left(\frac{N}{N'} - s \right)}{t} \right]$$

Per ricavare s e t , occorre eseguire due misure per ogni asse: una facendo in modo che esso abbia la stessa direzione di \vec{g} e verso opposto; l'altra ponendo l'asse normalmente a \vec{g} . Infatti,

$$\begin{cases} s = \frac{N}{N'} & \text{con } a = 0 \\ t = 2.5 \left(\frac{N}{N'} - s \right) & \text{con } a = g \end{cases} \quad (2.9)$$

Le relazioni appena ricavate consentono di definire sperimentalmente il punto di zero e la sensibilità di uno specifico sensore. In questo

modo è possibile determinare una correzione per ridurre l'incertezza derivante dal fatto che le specifiche tecniche fornite dal produttore sono espresse in termini statistici su una vasta popolazione di sensori. I nostri inclinometri, come già descritto nel capitolo 1, sono costituiti da un accelerometro MEMS montato assieme ad altri componenti su un circuito stampato. Il tutto è inserito in un contenitore impermeabile (cfr. cap.1, fig.11) a sua volta fissato all'interno di un tubo metallico. A ogni tappa del processo di assemblaggio corrisponde un diverso livello di zero: quello del MEMS preso singolarmente differisce dallo zero del circuito stampato inserito nel contenitore, che a sua volta varia rispetto al livello di zero del sistema "MEMS-Contenitore-Tubo" (che costituisce un segmento dell'*ago* descritto nel primo capitolo). Queste considerazioni, legate all'assemblaggio del sistema di misura, devono essere affiancate da osservazioni aggiuntive legate alla sua installazione. L'*ago* è inserito nel suolo e quindi si deve tenere presente che ciò produce un'ulteriore variazione dell'offset, legata in primo luogo all'inclinazione della perforazione e anche all'assestamento meccanico e termico del sistema.

Per queste motivazioni il livello di zero è identificato dalla prima misura effettuata dopo l'installazione e stabilizzazione dello strumento.

Per quanto riguarda la sensibilità, sono state eseguite delle misure per caratterizzare i sensori, seguendo la seguente procedura: gli inclinometri sono stati sistemati su un supporto, rigidamente fissato a un'asta di lunghezza nota L , in modo da avere gli assi concordemente orientati. Collocando degli spessori h_i sotto un estremo dell'asta, abbiamo potuto misurare le diverse inclinazioni rilevate dai sensori. Infatti, se indichiamo con α_i l'angolo corrispondente allo spessore h_i , allora abbiamo che

$$\sin \alpha_i = \frac{h_i}{L}$$

e quindi la (2.8) diventa

$$\frac{N_i}{N'_i} = s + 0.4t \sin \alpha_i = s + 0.4t \frac{h_i}{L}$$

dove i è l'indice che identifica i diversi spessori e quindi gli angoli misurati. Nella tabella 3 sono riportati i valori di h_i e la lunghezza dell'asta utilizzata. Per i dati nella tabella non sono indicati gli errori poiché trascurabili rispetto all'incertezza concernente le misure effettuate con gli inclinometri.

L	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
1050 mm	3.6 mm	7.2 mm	10.8 mm	14.4 mm	18 mm

Tabella 4: Dati riguardanti le caratteristiche geometriche del sistema di taratura.

Le misure sono state eseguite su tutti gli accelerometri contemporaneamente, al fine di ridurre gli errori sistematici. Durante le acquisizioni la temperatura è rimasta costante. La taratura è stata compiuta per gli assi y e z , tralasciando volutamente l'asse x , in quanto, nel sistema installato, esso è diretto normalmente alla superficie del terreno. Grazie ai dati raccolti è stato possibile costruire 60 grafici (30 per y e 30 per z) come quello nella Figura 5, dove sull'asse delle ascisse sono riportati i valori di h_i/L e su quello delle ordinate, i valori di N_i/N'_i . La retta raffigurata è ottenuta dai dati, per regressione lineare, e l'errore è indicato dalla deviazione standard sulle misure. Ciascuna di queste rette consente di ricavare s e t per l'inclinometro cui si riferisce. Per le ragioni già accennate, questa procedura non è mirata alla determinazione del parametro s , che è in questo caso influenzato dalla presenza di un offset meccanico, dovuto al montaggio.

Ricavando il parametro t per ogni inclinometro, è possibile utilizzarlo nei successivi calcoli per determinare l'inclinazione, evitando l'errore che si commetterebbe affidandosi al valore tipico dichiarato dal produttore.

Nel documento contenente le specifiche del sensore utilizzato (LIS3L02AL), ST Microelectronics ha inserito una serie di grafici a

istogrammi, dove sono riportate statisticamente le caratteristiche dei sensori. Nelle figure 6 e 7 sono rappresentati gli istogrammi relativi ai valori di t , ricavati dalle rette di regressione lineare per gli assi y e z , per i 30 sensori da noi utilizzati.

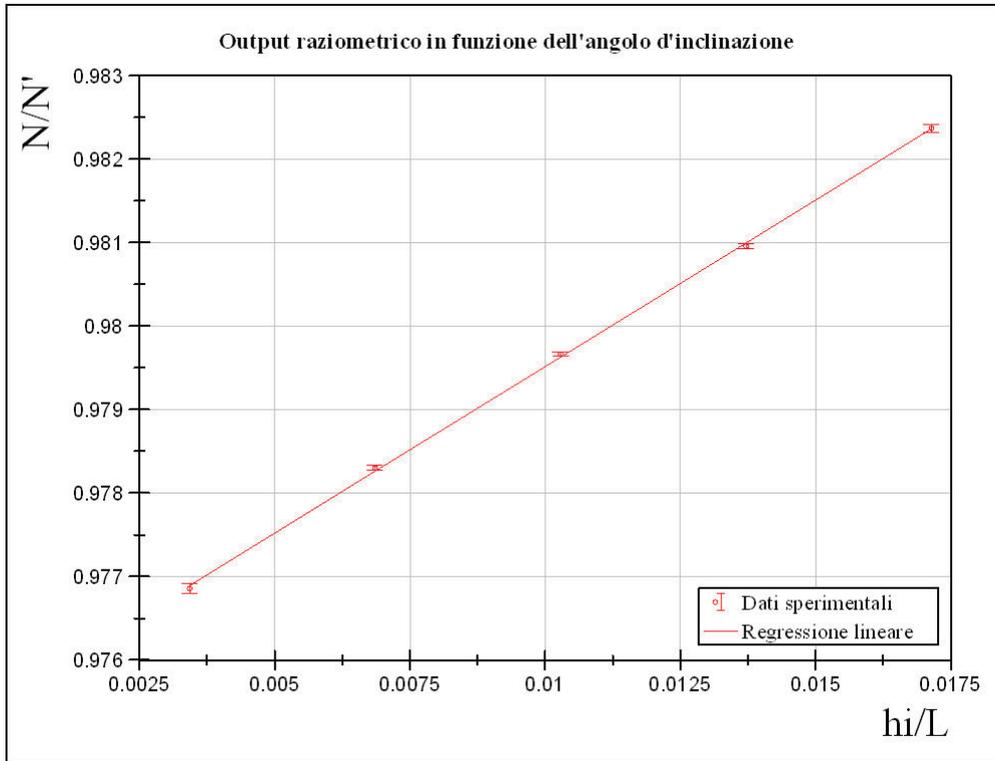


Figura 5: Grafico che mostra la relazione fra l'uscita raziometrica dell'accelerometro e l'angolo d'inclinazione dell'asta (rappresentato dal rapporto h_i/L).

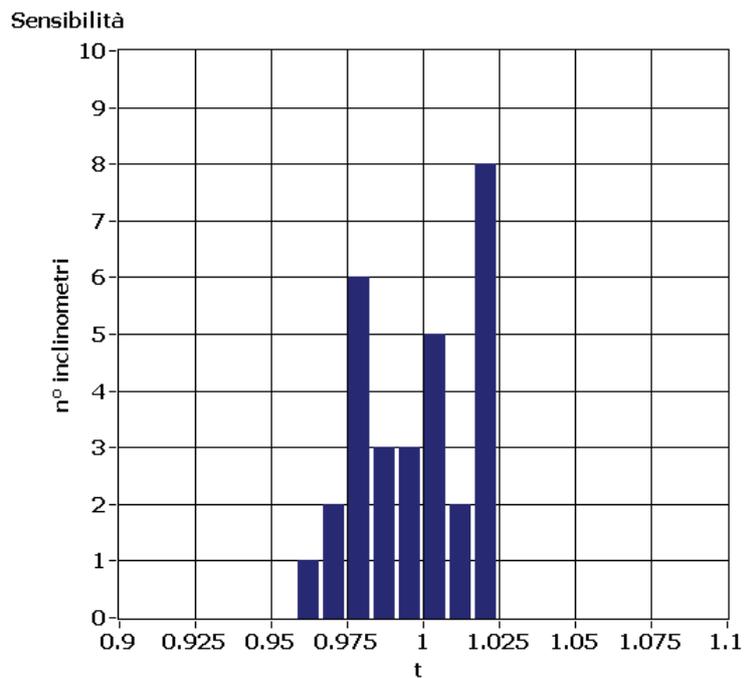


Figura 6: Istogramma riguardante i valori della sensibilità (espressi in termini del parametro t , definito a pag. 44) sull'asse y e per i 30 accelerometri utilizzati nel nostro sistema di monitoraggio.

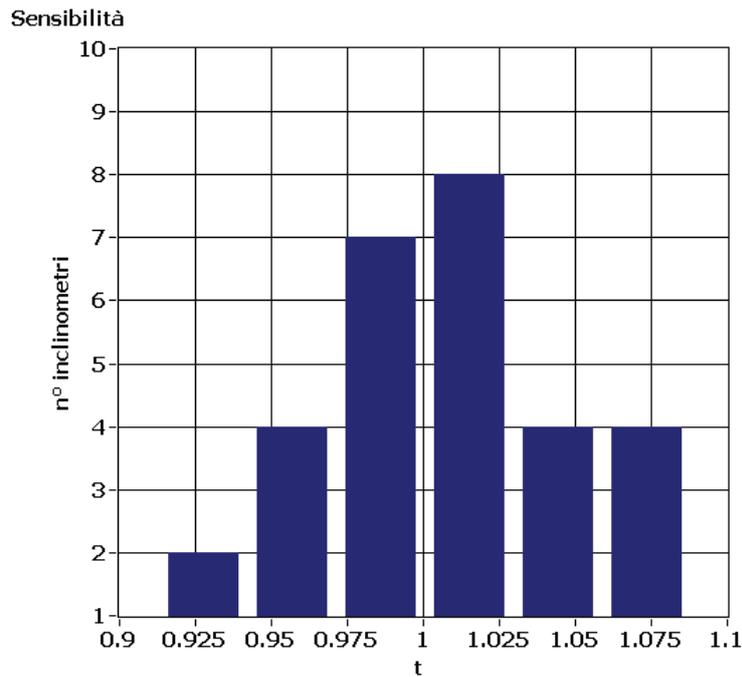


Figura 7: Istogramma riguardante i valori della sensibilità (espressi in termini del parametro t , definito a pag. 44) sull'asse z per i 30 accelerometri utilizzati nel nostro sistema di monitoraggio.

Osservando questi istogrammi è possibile fare alcune considerazioni sulle caratteristiche dei sensori impiegati. Innanzi tutto si vede che, per entrambi gli assi, i valori ottenuti per t sono all'interno dell'intervallo indicato dal costruttore. Essi sono pertanto coerenti con le specifiche riportate nella tabella 3 e con i grafici presenti nel documento con le specifiche del sensore. Si osserva anche il maggiore sparpagliamento dei valori riferiti all'asse z . Questa caratteristica è dovuta alla geometria interna del MEMS, che permette di raggiungere livelli maggiori di sensibilità per gli assi x e y .

Sarebbe stato preferibile sfruttare questi due assi per il nostro sistema, ma ciò non è stato possibile a causa dei limiti stringenti imposti dalla geometria dei segmenti degli *aghi*, sulle dimensioni del circuito integrato. Utilizzando le componenti y e z come assi di misura dell'inclinazione, abbiamo potuto sfruttare al meglio lo spazio all'interno del tubo metallico, potendo sviluppare il circuito integrato lungo la direzione del suo asse. In caso contrario, avremmo dovuto aumentare il diametro del tubo, per consentire l'alloggiamento dell'inclinometro e avremmo avuto anche maggiori difficoltà nel realizzare i collegamenti fra i sensori.

Nelle figure 8 e 9 sono raffigurati gli istogrammi ottenuti con i valori di s ricavati dalle rette di regressione lineare per gli assi y e z .

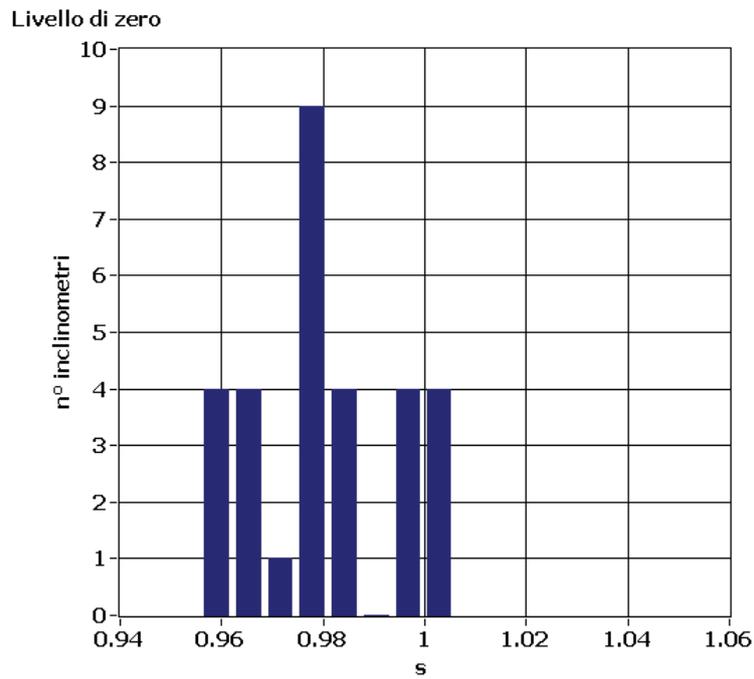


Figura 8: Istogramma riguardante i valori del livello di zero (espressi in termini del parametro s , definito a pag. 44) dell'asse y per i 30 accelerometri utilizzati nel nostro sistema di monitoraggio.

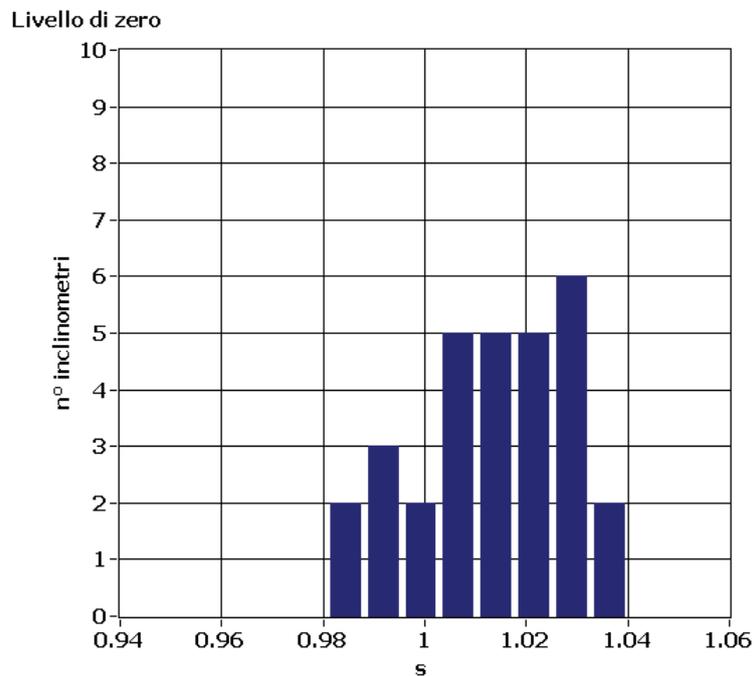


Figura 9: Istogramma riguardante i valori del livello di zero (espressi in termini del parametro s , definito a pag. 44) dell'asse z per i 30 accelerometri utilizzati nel nostro sistema di monitoraggio.

Come già detto, nel nostro caso non è importante conoscere il livello di zero di ogni sensore. Questi grafici non sono costituiti da misure precise del parametro s , proprio a causa di un offset non quantificabile con questa procedura. Tuttavia, è interessante osservare la forma di queste distribuzioni di dati, perché può fornire indicazioni sul corretto funzionamento dei sensori.

Osservando i grafici e i dati forniti dal produttore (cfr. tabella 3) si vede che i valori statistici dei livelli di zero sono distribuiti attorno a quello che è definito valore tipico del sensore per quel parametro. Nel nostro caso, se avessimo misurato s in maniera rigorosa, avremmo dovuto trovare i valori distribuiti attorno a $s = 1$ (che corrisponde a un livello di zero uguale a $V_{DD}/2$). Ciò che si osserva invece sono due distribuzioni con la forma attesa, ma che appaiono “*slittate*” rispetto a $s = 1$. Questo *slittamento* è indicativo dell’offset medio dei sensori (angolo di zero) rispetto all’asta cui sono vincolati, che fa parte del sistema di taratura che abbiamo utilizzato.

2.2. Errore raziometrico

Una delle caratteristiche più importanti degli accelerometri MEMS utilizzati è la dipendenza delle loro uscite dalla tensione di alimentazione. Questo perché si tratta di sensori a variazione capacitiva e la tensione fornita per alimentarli genera una forza elettrostatica sulle armature dei condensatori che rilevano i movimenti della massa inerziale (vedi capitolo 1). Generalmente la correzione raziometrica è applicata facendo il rapporto fra segnale in uscita e tensione di alimentazione, poiché la dipendenza da quest’ultimo è con buona approssimazione lineare. Se la tensione di alimentazione è pari a 3.3 V, la correzione raziometrica lineare è sufficiente. Se invece intervengono sbalzi in V_{DD} , o comunque essa si discosta dal valore “consigliato”, l’effetto sull’uscita del sensore non è più lineare e avviene il cosiddetto *errore raziometrico*.

Per completare l'analisi sui sensori MEMS utilizzati, abbiamo eseguito delle misure per studiare in maniera più approfondita il loro comportamento radiometrico. A tale scopo ci siamo serviti di un supporto inclinabile, di un sensore rigidamente fissato a esso e di un generatore digitale di tensione, opportunamente filtrato per stabilizzare al meglio la tensione erogata.

Abbiamo acquisito i segnali in uscita dal sensore variandone sia l'inclinazione, sia la tensione d'alimentazione (tramite il generatore digitale). Nella Figura 10 è illustrato uno schema indicativo, con lo scopo di mostrare com'è cambiato l'orientamento del sensore durante il test: in 10a si vede la posizione iniziale dell'accelerometro; in 10b è raffigurata una posizione intermedia; in 10c invece si vede la collocazione finale del sensore, ruotato di circa 160° .

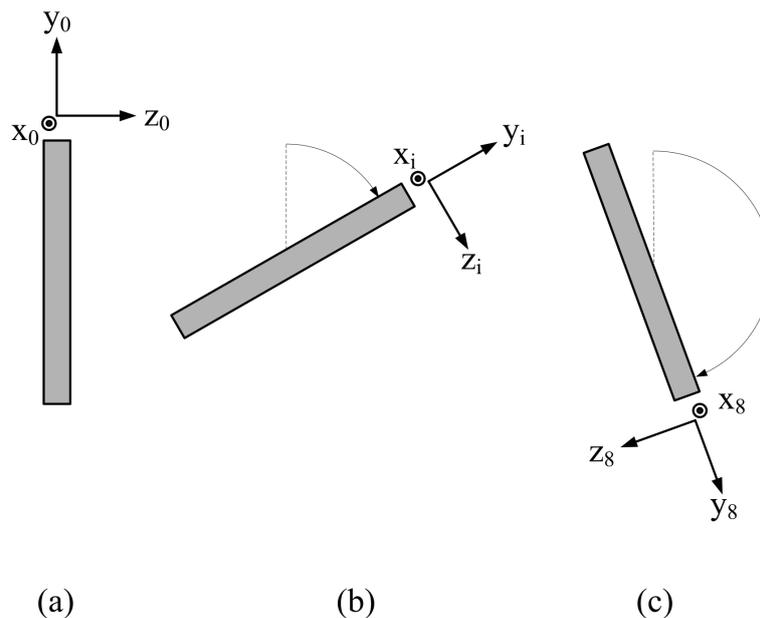


Figura 10: Schema che descrive le modalità di test delle caratteristiche radiometriche del sensore. Nella Figura sono rappresentati: (a) la posizione iniziale; (b) la posizione i -esima intermedia; (c) la nona e ultima posizione.

Per ogni posizione di misura, ottenuta dalla precedente per rotazione di un angolo costante, abbiamo variato la tensione di alimentazione fra 3 e 3.5 V, con passo di 20 mV. In totale abbiamo quindi compiuto 234 misure (26 per ognuna delle 9 posizioni).

Poiché la tensione impostata sul generatore è leggermente diversa da quella realmente erogata, abbiamo acquisito il suo livello durante le misure. Nel grafico in Figura 11 si vede la corrispondenza fra il valore impostato sul generatore e la tensione effettivamente fornita.

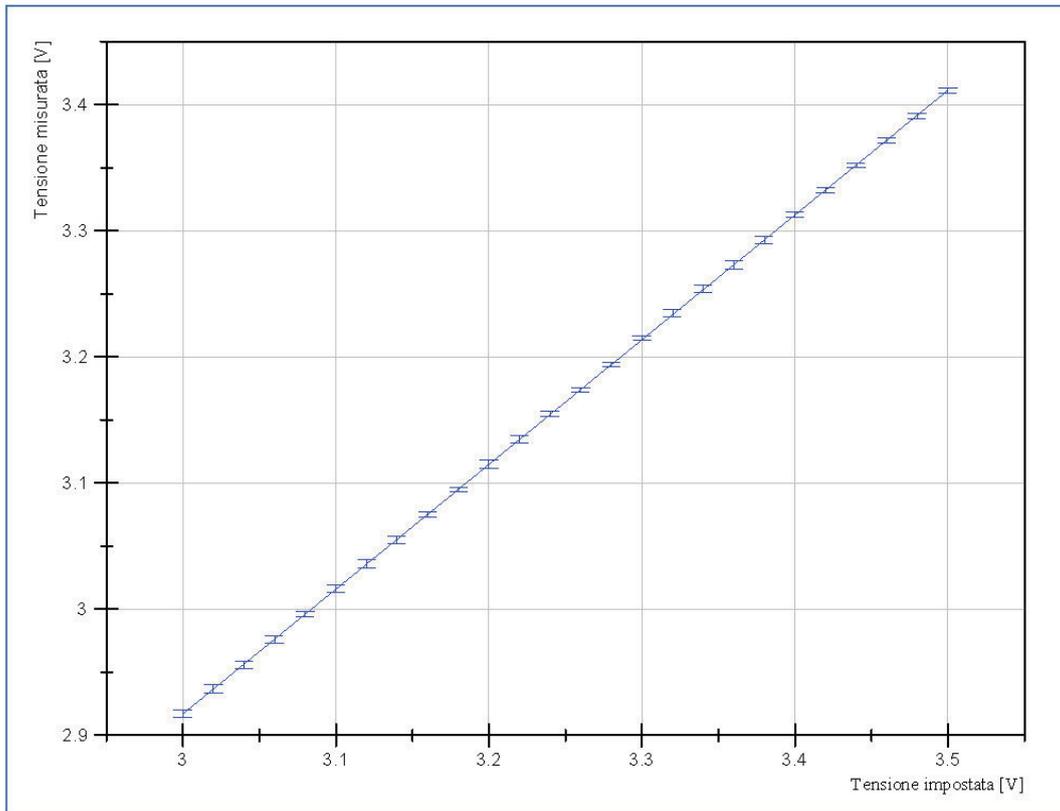


Figura 11: Rapporto fra tensione di alimentazione impostata sul generatore digitale e misurata con la scheda di acquisizione. Nel grafico è riportata la retta di interpolazione ($r^2 = 0.99$) dei valori medi della tensione, calcolati sulle 9 posizioni di misura, e la relativa deviazione standard.

I valori nel suddetto grafico sono stati ottenuti calcolando il valor medio delle tensioni per ognuna delle 9 inclinazioni: nel grafico si vede la retta di interpolazione lineare dei dati, con $r^2 = 0.99$, e le deviazioni standard per i singoli punti di misura.

Nella Figura 12 sono riportate le tensioni in uscita dall'accelerometro sui tre canali, in funzione della posizione e della tensione di alimentazione: in questo caso non è stata applicata la correzione raziometrica.

Questo grafico ricalca quanto schematizzato nella Figura 10: la rotazione avviene attorno all'asse x , per il quale, a parità di tensione, l'uscita rimane pressoché costante al variare della posizione; l'asse y

passa dal valore massimo (+g) al valore minimo (-g), passando attraverso il livello di zero (indicato anche come offset); l'asse z, nella posizione iniziale è orientato normalmente a \vec{g} , e cambiando l'inclinazione, la sua uscita diminuisce fino al valore minimo (-g), per poi aumentare nuovamente.

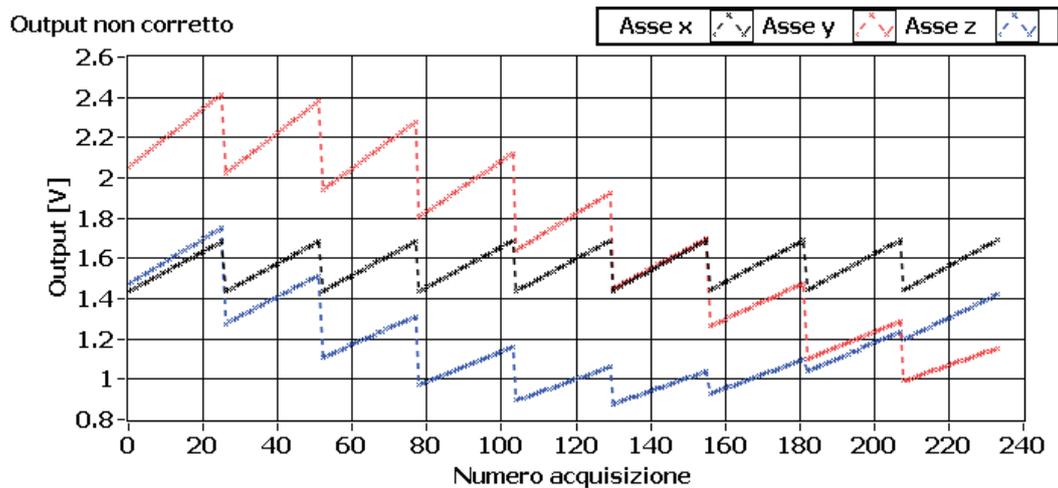


Figura 12: Uscita dell'accelerometro sugli assi x , y e z , prima della correzione raziometrica. Ogni "rampa" è costituita da 26 diversi valori di tensione d'alimentazione e rappresenta un'inclinazione diversa.

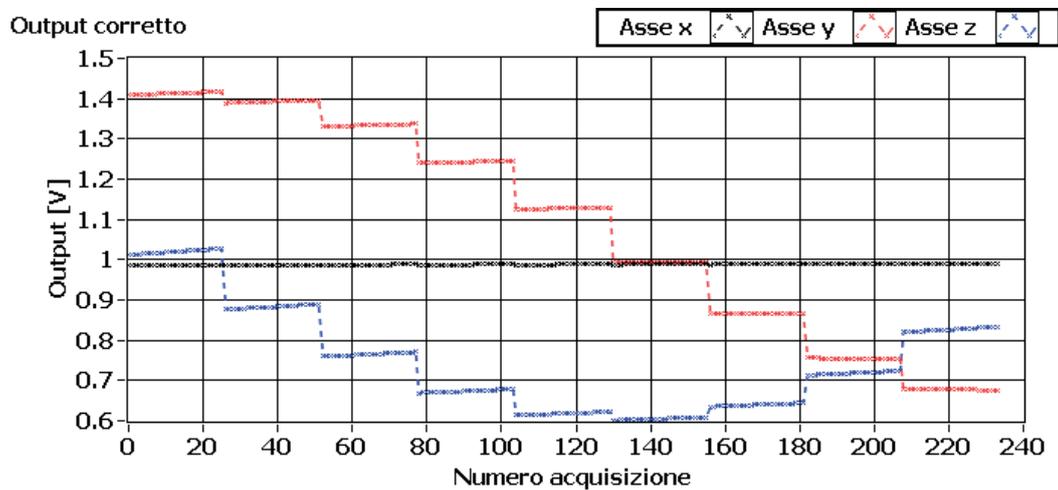


Figura 13: Uscita dell'accelerometro sugli assi x , y e z , dopo la correzione raziometrica. Ogni "rampa" è costituita da 26 diversi valori di tensione d'alimentazione e rappresenta un'inclinazione diversa.

Il grafico della Figura 13 offre una prima conferma qualitativa di quanto appena affermato. Esso rappresenta l'uscita sui tre canali dell'accelerometro dopo l'applicazione della correzione raziometrica. In particolare,

$$\text{Output [V]} = V_{out} = \frac{V'_{out}}{V_{DD}/2}$$

dove, V_{DD} è la tensione di alimentazione, mentre V'_{out} e V_{out} indicano il generico (x , y o z) prima e dopo la correzione. Com'è possibile notare dal grafico, è ancora presente una dipendenza da V_{DD} . Tale effetto, costituisce l'*errore raziometrico* (Kionix, 2007) e agisce sul livello di zero e sulla sensibilità dell'accelerometro. Per l'offset abbiamo che

$$O_{L_{0g}}(V_{DD}) = \left[\frac{L_{0g}(V_{DD})}{L_{0g}(3.3 \text{ V})} - \frac{V_{DD}}{3.3 \text{ V}} \right] \cdot 100 \quad (2.10)$$

dove $L_{0g}(V_{DD})$ indica il livello di zero alla tensione V_{DD} . L'errore sulla sensibilità dell'accelerometro è invece definito da

$$O_S(V_{DD}) = \left[\frac{S(V_{DD})}{S(3.3 \text{ V})} - \frac{V_{DD}}{3.3 \text{ V}} \right] \cdot 100 \quad (2.11)$$

dove $S(V_{DD})$ indica la sensibilità alla tensione V_{DD} . Queste espressioni consentono di quantificare la percentuale d'errore rispetto al sistema alimentato a 3.3 V, valutando lo spostamento dal comportamento raziometrico ideale, che vorrebbe un aumento lineare del livello di zero e della sensibilità in funzione della tensione.

Con questo test abbiamo voluto approfondire lo studio delle caratteristiche del sensore utilizzato: per determinare l'errore raziometrico sarebbe stato sufficiente acquisire l'uscita del sensore in corrispondenza dello zero e dei limiti dell'intervallo di misura ($\pm g$); valutando l'uscita su più posizioni è stato possibile raccogliere informazioni più specifiche sull'entità dell'errore raziometrico per sensibilità e offset.

I valori del livello di zero e della sensibilità alle varie tensioni sono stati ottenuti tramite regressione lineare dai dati raccolti: fissando il periodo, abbiamo trovato la miglior sinusoide interpolante. In questo modo, si sono ottenute 26 sinusoidi (ciascuna con $r^2 = 0.99$) per ogni asse e da ognuna di esse sono stati ricavati valor medio e ampiezza. Tali parametri sono indicativi del livello di zero e della sensibilità

dell'accelerometro e quindi consentono di costruire dei grafici che mostrano l'andamento di questi due parametri in funzione della tensione di alimentazione.

L'analisi che segue non tiene conto dell'errore sistematico che interessa questo test. L'orientamento del sensore non è perfetto (l'asse x non è esattamente parallelo a quello di rotazione) e questo fa sì che l'uscita sull'asse x non sia nulla, come sarebbe nel caso ideale. Analogamente, i valori rilevati su y e z , sono leggermente inferiori, in modulo, di quelli che si otterrebbero in caso di perfetto allineamento. Questa imprecisione può essere corretta, ma è comunque irrilevante per lo scopo di questa misura, poiché il nostro interesse ricade sugli effetti prodotti dalle variazioni della tensione di alimentazione, che possono essere efficacemente valutati. Inoltre, il sistema di monitoraggio che abbiamo realizzato, si basa su misure differenziali di piccoli angoli attorno alla posizione di zero. Tale situazione è rappresentata dall'asse x , che al variare delle inclinazioni impostate, offre la possibilità di valutare l'effetto dell'errore raziometrico su piccoli angoli. Si può quindi affermare che la piccola deviazione dell'asse x dell'accelerometro rispetto all'asse di rotazione del sistema, non solo non inficia la validità del test, ma fornisce rilevanti informazioni aggiuntive.

Nelle figure 14, 15 e 16 sono riportati due grafici rappresentativi dei dati acquisiti durante il test appena descritto. Invece di indicare 26 curve (una per ogni valore della tensione in ingresso), si è deciso di raffigurarne l'intervallo di variabilità e di evidenziare solamente l'insieme dei dati corrispondente alla tensione di alimentazione ideale di 3.3 V. Pertanto, nel primo grafico di tali figure si vede l'andamento dell'uscita in funzione dell'inclinazione: la banda colorata rappresenta l'intervallo entro cui sono contenute le curve corrispondenti ai valori di V_{DD} impostati durante il test.

Nel secondo grafico di ogni figura, rappresentata con le medesime modalità del primo grafico, si può vedere la differenza fra i valori sperimentali e le corrispondenti curve di interpolazione.

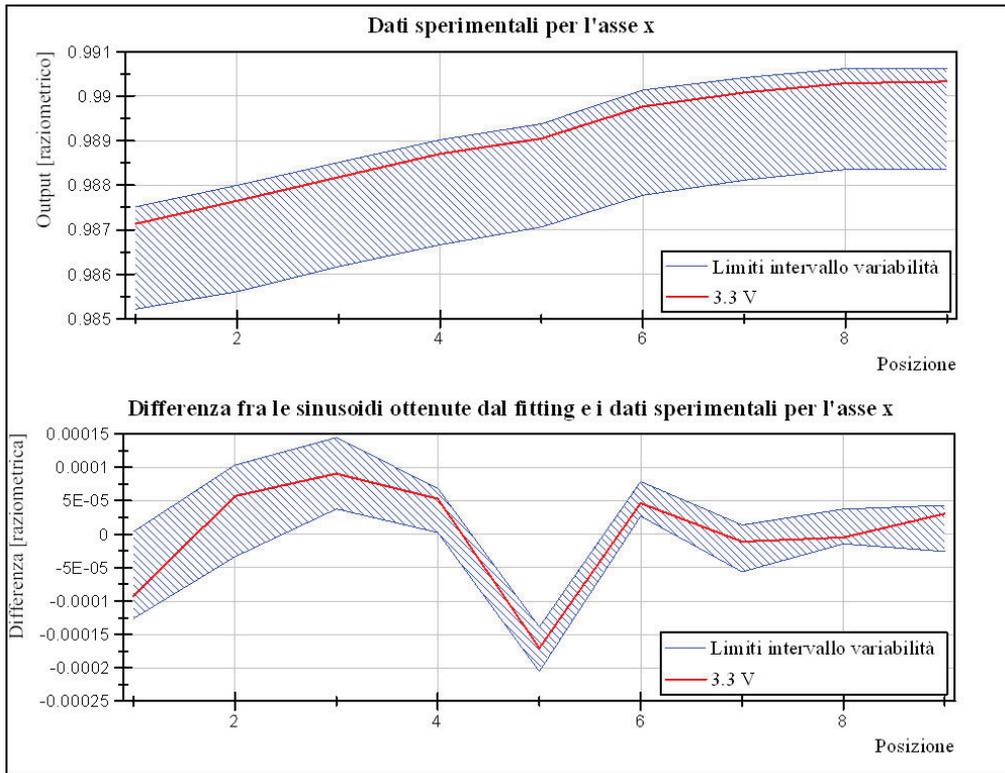


Figura 14: Grafici inerenti all'asse x, che rappresentano: (primo grafico) banda d'escursione dell', dovuta alla variazione della tensione d'alimentazione, in funzione dell'inclinazione; (secondo grafico) differenza fra i valori del primo grafico e le corrispondenti sinusoidi interpolanti. In rosso è indicata la serie di dati corrispondente alla tensione d'alimentazione di 3.3 V.

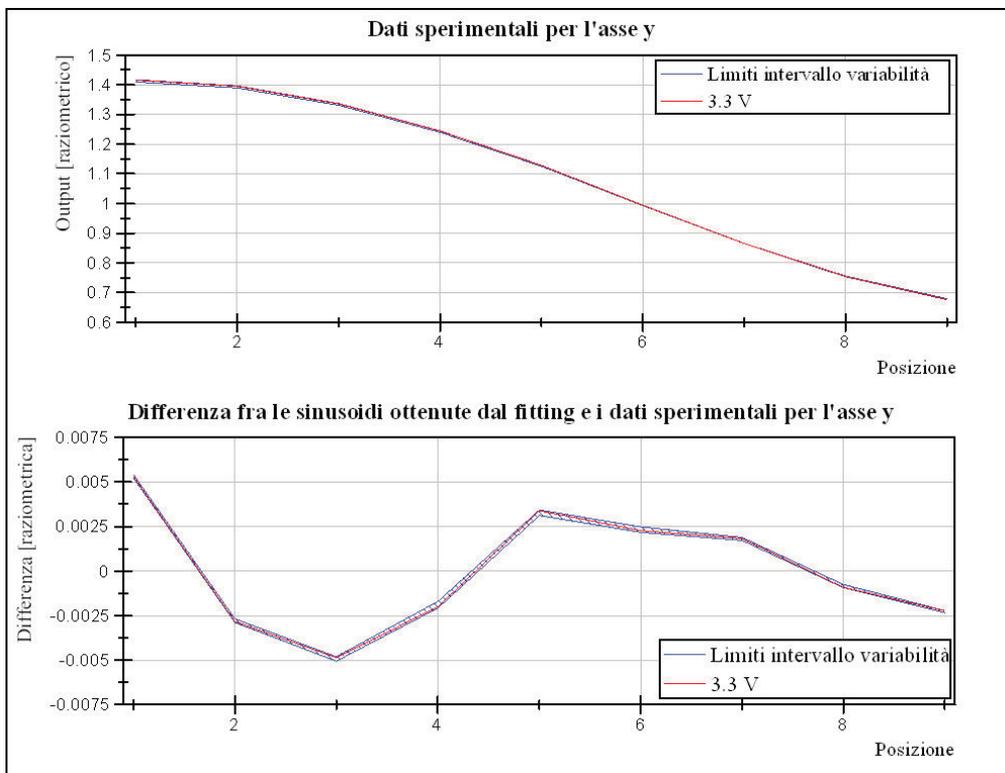


Figura 15: Grafici inerenti all'asse y, che rappresentano: (primo grafico) banda d'escursione dell', dovuta alla variazione della tensione d'alimentazione, in funzione dell'inclinazione; (secondo grafico) differenza fra i valori del primo grafico e le corrispondenti sinusoidi interpolanti. In rosso è indicata la serie di dati corrispondente alla tensione d'alimentazione di 3.3 V.

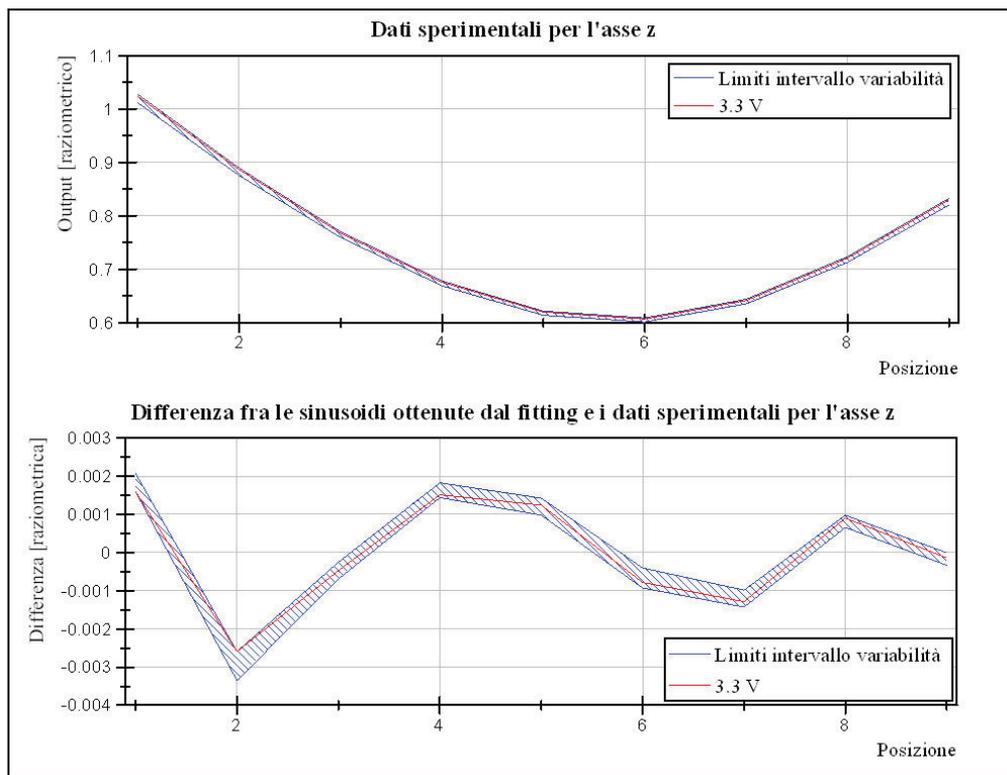


Figura 16: Grafici inerenti all'asse z, che rappresentano: (primo grafico) banda d'escursione dell', dovuta alla variazione della tensione d'alimentazione, in funzione dell'inclinazione; (secondo grafico) differenza fra i valori del primo grafico e le corrispondenti sinusoidi interpolanti. In rosso è indicata la serie di dati corrispondente alla tensione d'alimentazione di 3.3 V.

I dati mostrati nei grafici delle figure 14, 15 e 16 sono espressi in termini raziometrici e quindi sono adimensionali. In condizioni ideali, per cui $t=1$ e $s=1$ (parametri, introdotti in precedenza per indicare la tolleranza su sensibilità e offset), facendo riferimento all'equazione (2.8) si ha che l'intervallo raziometrico compreso fra 0.6 e 1.4 corrisponde, in unità di [g], all'intervallo $\pm g$.

Si noti che l'escursione massima che si riscontra nel primo grafico relativo all'asse x, è inferiore a $4 \cdot 10^{-3}$, in unità raziometrica. Poiché tale dislivello è dovuto a 9 incrementi angolari uguali, le misure sono rappresentative di variazioni dell'ordine di $4 \cdot 10^{-4}$. Questo valore è espresso in unità raziometrica e, per quanto detto sopra, corrisponde a 1 mg in unità di [g]. Ciò significa che sull'asse x, per le misure eseguite, le variazioni dell'accelerazione rilevate sono paragonabili alla risoluzione del sensore. Il fatto che le sinusoidi ottenute dall'interpolazione dei dati sperimentali abbiano $r^2 = 0.99$ significa che l'errore raziometrico non altera la risoluzione del sensore.

Per quanto riguarda i grafici con le differenze fra dati sperimentali e curve ricavate per regressione lineare, possiamo notare che il loro andamento è molto simile al variare di V_{DD} : la banda che determina i limiti dell'intervallo di variazione ha ampiezza inferiore a 10^{-3} per tutti e tre gli assi. Ciò significa che le massime deviazioni dei dati sperimentali dall'andamento delle sinusoidi interpolate sono dovute a errori di posizionamento e non a errori di misura dell'accelerometro.

Ricavando i valori medi e le ampiezze delle sinusoidi interpolate è possibile costruire dei grafici che rappresentino, per ciascuno degli assi, le variazioni dell'offset e della sensibilità del sensore, in funzione di V_{DD} . Nelle figure 17, 18 e 19, sono riportati i grafici di cui sopra, dove compaiono i punti sperimentali, con la deviazione standard e le rette ricavate per regressione lineare, le quali hanno tutte $r^2 \geq 0.98$, a parte quella del secondo grafico della Figura 17, che ha $r^2 = 0.28$. Inoltre, nei grafici riguardanti l'ampiezza, a ciascun termine è stato sottratto il valore del dato corrispondente a $V_{DD} = 3.29$ V. In questo modo si mette in evidenza la variazione dell'ampiezza della sinusoide interpolata riferendola al valore ideale dell'alimentazione.

Osservando i grafici delle figure 17, 18 e 19, si possono effettuare alcune considerazioni riguardanti la variazione del livello di zero. Aumentando V_{DD} , si ottiene un incremento dell'offset, sul segnale raziometrico. I coefficienti angolari delle rette di interpolazione per la variazione del livello di zero sono i seguenti:

- $k_{offset,x} = 4.7 \cdot 10^{-3} \text{ [1/V]}$
- $k_{offset,y} = 4.0 \cdot 10^{-3} \text{ [1/V]}$
- $k_{offset,z} = 3.1 \cdot 10^{-2} \text{ [1/V]}$

Questo evidenzia che gli assi x e y hanno un comportamento confrontabile, mentre per z , l'effetto dell'errore raziometrico sull'offset è maggiore di un ordine di grandezza, rispetto agli altri due assi.

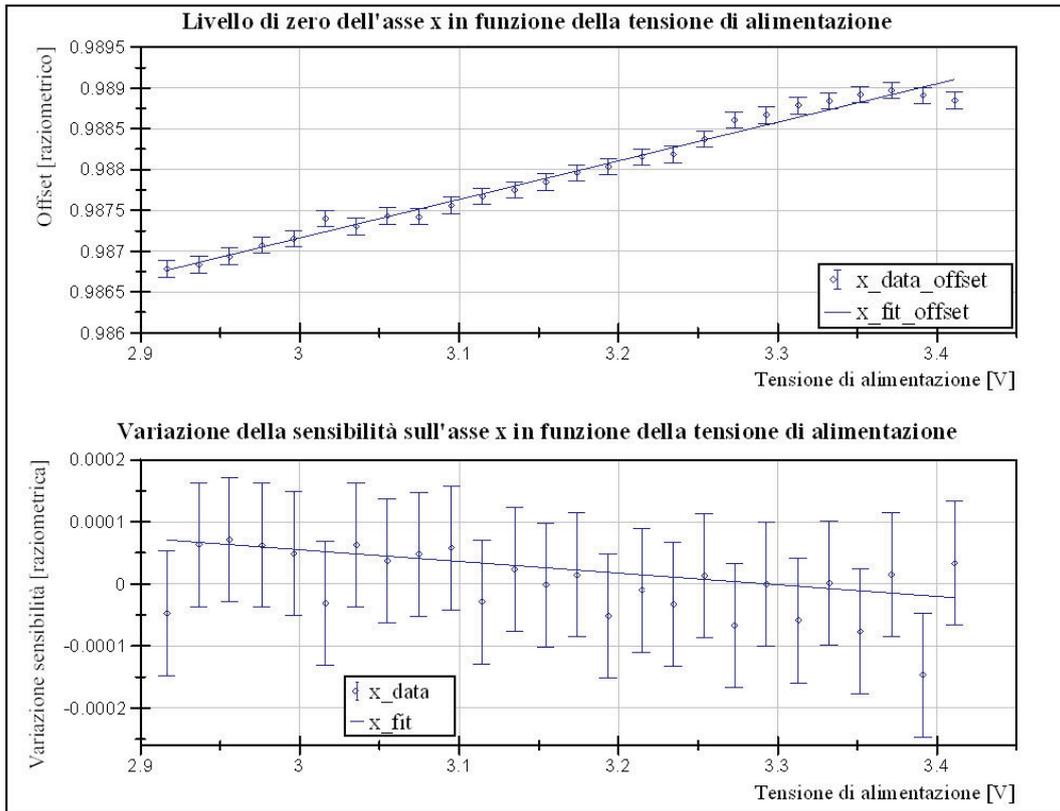


Figura 17: Grafici che si riferiscono all'asse x, che mostrano la relazione fra la tensione di alimentazione e le variazioni di offset e uscita del sensore.

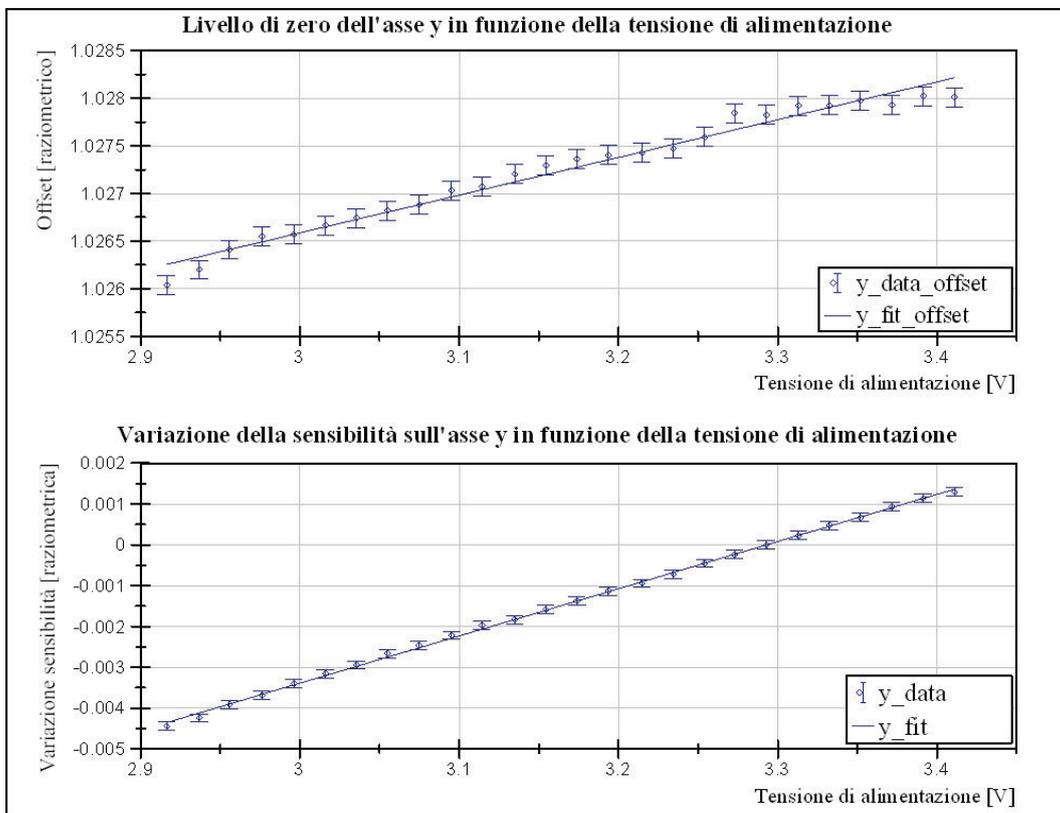


Figura 18: Grafici che si riferiscono all'asse y, che mostrano la relazione fra la tensione di alimentazione e le variazioni di offset e del sensore.

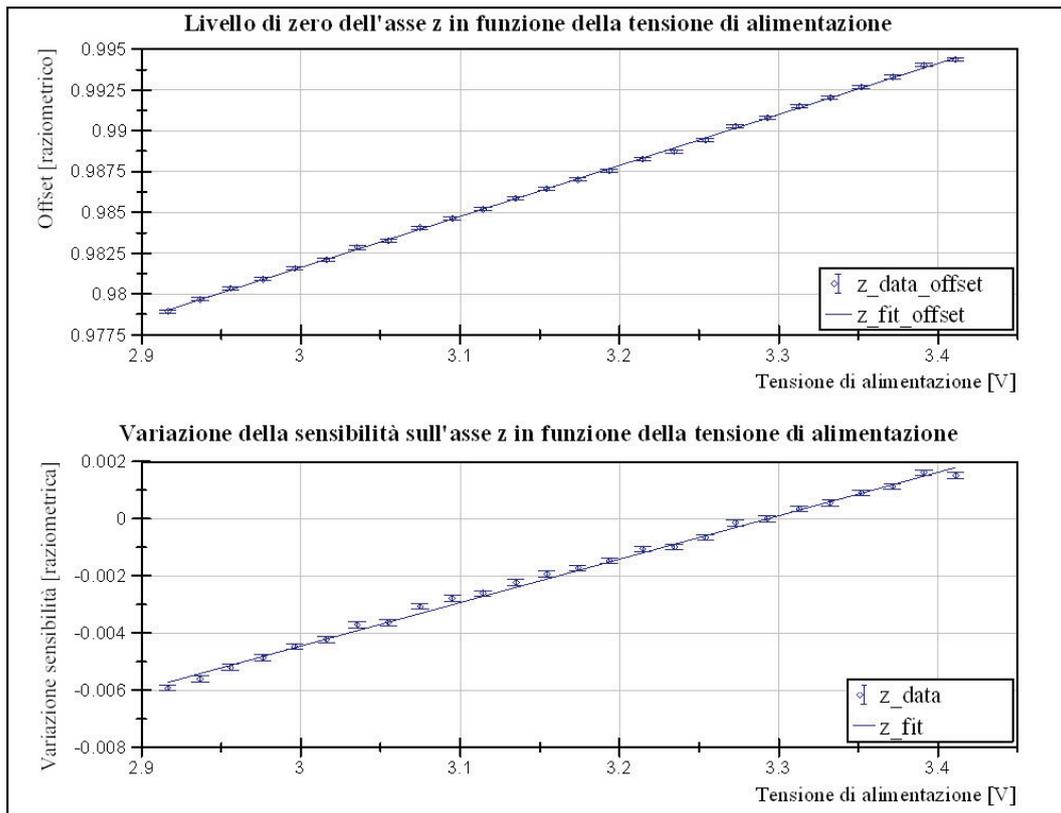


Figura 19: Grafici che si riferiscono all'asse z, che mostrano la relazione fra la tensione di alimentazione e le variazioni di offset e del sensore.

Consideriamo ora i grafici che mostrano come varia l'ampiezza della sinusoide interpolata in funzione della tensione d'alimentazione. In questo caso, i coefficienti angolari delle rette di interpolazione sono:

- $k_{amp,x} = -1.8 \cdot 10^{-4} \text{ [1/V]}$
- $k_{amp,y} = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ [1/V]}$
- $k_{amp,z} = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ [1/V]}$

Tralasciando l'asse x, per il quale la retta interpolante ha un $r^2 = 0.28$, possiamo notare che, per y e z, k_{amp} è dello stesso ordine. Inoltre, per y, l'apporto maggiore all'errore raziometrico è dato dalla variazione sulla sensibilità, mentre per z, nessuno dei due contributi è preponderante.

Per spiegare il comportamento rilevato per l'asse x, occorre compiere un'analisi che consenta di stimare la variazione della sensibilità in funzione anche dell'inclinazione.

Riguardo ai grafici della figura, occorre precisare che:

- l'asse x rappresenta la serie di dati ottenuta con $V_{DD} = 3.29 \text{ V}$;
- la linea blu tratteggiata indica la serie di dati con il valore minimo per la tensione d'alimentazione, $V_{DD} = 2.92 \text{ V}$;
- la linea rossa tratteggiata ($V_{DD} = 3.42 \text{ V}$) e quella gialla ($V_{DD} = 3.17 \text{ V}$) sono equidistanti dallo zero. La regione delimitata da queste due curve comprende i valori più prossimi alla tensione d'alimentazione ottimale ($V_{DD} = 3.3 \text{ V}$). Per questo motivo, le curve in essa comprese sono di maggiore interesse rispetto a quelle corrispondenti a valori di V_{DD} più lontani da 3.3 V .

Il grafico riguardante l'asse x non è stato inserito poiché tutte le curve sono comprese in un intervallo di circa 10^{-4} e quindi l'errore raziometrico sulla sensibilità, per quell'asse è trascurabile.

Questo fatto si spiega osservando gli altri due grafici, da cui si vede chiaramente che l'errore raziometrico sulla sensibilità dell'accelerometro dipende dall'inclinazione di quest'ultimo. In particolare, l'errore cresce all'aumentare dell'accelerazione. Nelle misure inclinometriche, l'errore per un dato asse è massimo quando esso è parallelo a \vec{g} . Quando un asse è orientato normalmente a \vec{g} (come x nel nostro caso) invece, l'errore raziometrico sulla sensibilità è trascurabile e rimane solamente il contributo sull'offset, che non dipende dall'inclinazione.

Alla luce di quanto visto finora possiamo evidenziare due fatti importanti:

- l'errore raziometrico sull'offset per l'asse z è maggiore di un ordine di grandezza rispetto a quello su x e y ;
- l'errore raziometrico sulla sensibilità dipende dall'inclinazione dell'accelerometro e, per un dato asse, è minimo quando l'accelerazione è nulla.

Queste due caratteristiche fanno sì che la condizione migliore per l'utilizzo di questi sensori come inclinometri, consiste nel compiere misure sfruttando gli assi x e y , nell'intorno dello zero.

Per completare lo studio delle caratteristiche raziometriche del sensore e dell'errore che ne deriva, prendiamo in considerazione le due formule (2.10) e (2.11) che esprimono la percentuale dell'errore raziometrico sull'offset e sulla sensibilità.

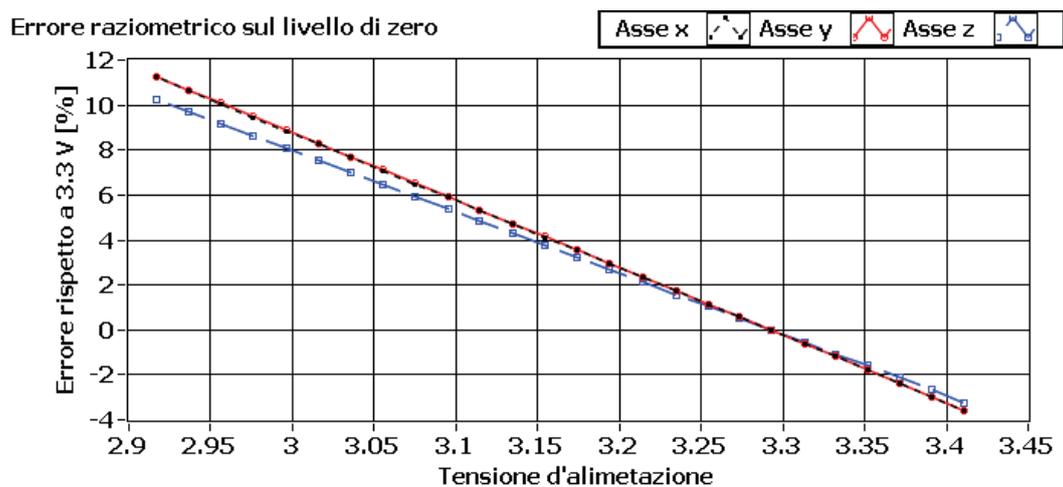


Figura 21: Grafico dell'errore raziometrico calcolato con (2.10), che indica la percentuale d'errore sull'offset, in funzione della tensione d'alimentazione del sensore. Le tre rette corrispondono agli assi x , y e z dell'accelerometro.

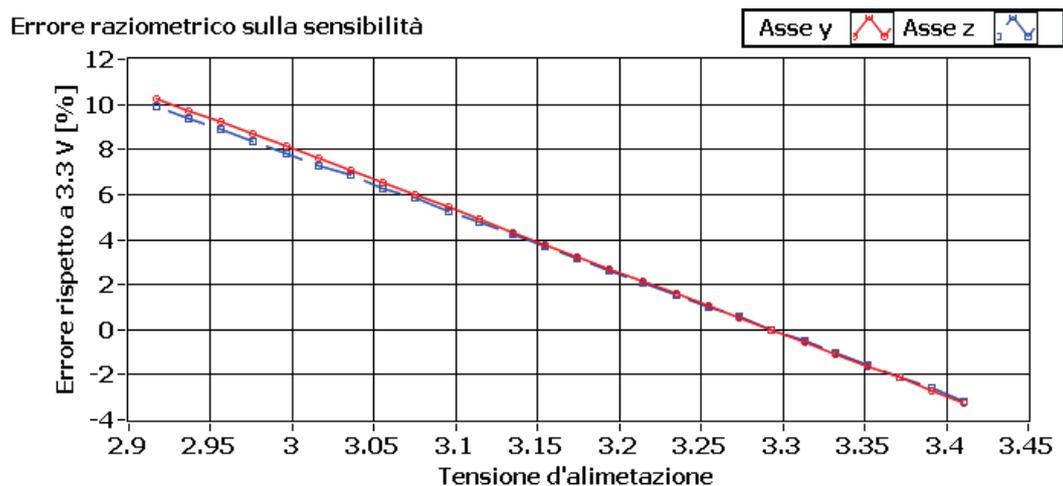


Figura 22: Grafico dell'errore raziometrico calcolato con (2.11), che indica la percentuale d'errore sulla sensibilità, in funzione della tensione d'alimentazione del sensore. Le due rette corrispondono agli assi y e z dell'accelerometro.

Nella Figura 21 è rappresentato un grafico risultante dalla formula (2.10), che esprime in termini percentuali l'errore sull'offset per i tre assi dell'accelerometro, in funzione della tensione d'alimentazione. Il grafico in Figura 22 rappresenta invece l'errore raziometrico percentuale che influisce sulla sensibilità del sensore, sempre in funzione di V_{DD} . In questo caso non è presente la retta riferita all'asse x , perché come abbiamo visto dall'analisi precedente, nell'intorno dello zero l'errore raziometrico sulla sensibilità diventa trascurabile.

Dai grafici si vede che, se si considera la tensione minima utilizzata nei nostri test, le variazioni di V_{DD} possono portare a errori anche superiori al 10%. Tuttavia, come già detto, l'intervallo di maggiore interesse è quello nell'intorno di 3.3 V, compreso fra 3.17 e 3.42 V, poiché difficilmente si registrano valori esterni ad esso. Se ci limitiamo a questi valori, l'errore raziometrico è inferiore, in modulo, al 4%.

Poiché la tensione d'alimentazione è uno dei parametri che sono acquisiti durante una misura, è possibile valutare la differenza rispetto a $V_{DD} = 3.3$ V e applicare una correzione dell'errore raziometrico, che si aggiunge a quella lineare normalmente utilizzata.

Tuttavia, per ridurre al minimo la necessità di applicare correzioni che appesantiscono l'elaborazione dei dati, è importante stabilizzare al meglio la tensione d'alimentazione, soprattutto nel caso di misure al limite della risoluzione dei sensori e quando sia necessario ottenere la massima precisione.

Nel terzo capitolo vedremo che, allo stato attuale, la stabilizzazione della tensione d'alimentazione degli accelerometri MEMS costituisce un limite del nostro sistema. Tale limitazione può essere superata modificando opportunamente il progetto della parte elettronica del sistema.

Le misure che abbiamo eseguito sul comportamento raziometrico dei sensori, hanno lo scopo di quantificare l'errore introdotto da una "cattiva" alimentazione degli inclinometri, per definire una opportuna correzione.

Per ottenere il miglior risultato possibile, si deve però procedere in primo luogo al miglioramento dell'hardware del sistema di monitoraggio, per poi concentrarsi sull'ottimizzazione delle misure, da eseguire tramite l'inserimento di correzioni raziometriche del secondo ordine.

Capitolo 3.

Analisi dei risultati

Il presente capitolo raccoglie i risultati ottenuti nelle misure che ci hanno permesso di studiare il funzionamento del sistema di monitoraggio e degli elementi che lo compongono. Si descrivono gli obiettivi finora raggiunti e i fattori di criticità individuati, per i quali sono indicate eventuali soluzioni e/o spunti per successive ricerche.

Il primo argomento affrontato riguarda la verifica della sensibilità e precisione dei sensori MEMS impiegati per misure inclinometriche. Collaborando con il Servizio Lavori Speciali Opere pubbliche della Provincia di Modena, sono state eseguite due campagne di test in cui abbiamo compiuto i rilevamenti necessari per ricostruire il profilo del fronte di una frana. Per le misure abbiamo utilizzato sia i nostri sensori, sia una sonda inclinometrica commerciale gentilmente messa a disposizione dalla Provincia di Modena, e normalmente utilizzata per queste operazioni.

Nella seconda parte del capitolo si descrive lo sviluppo del sistema *fisso*, riferendo i problemi tecnici incontrati operando sul campo.

Dopo una descrizione delle migliorie apportate agli elementi meccanici del sistema, sono esposti i risultati ottenuti e le modifiche da applicare al progetto della parte elettronica.

3.1. Confronto diretto con gli inclinometri “tradizionali”

L’esigenza di confrontare direttamente il nostro sistema di misura con un prodotto commerciale di riferimento deriva dalla necessità di verificare sul campo l’attendibilità e i limiti dei rilevamenti eseguiti tramite i nostri inclinometri. Le misure inclinometriche sono normalmente eseguite tramite servo-inclinometri monoassiali che sono installati in coppia su un carrello come quello schematizzato nella Figura 1a.

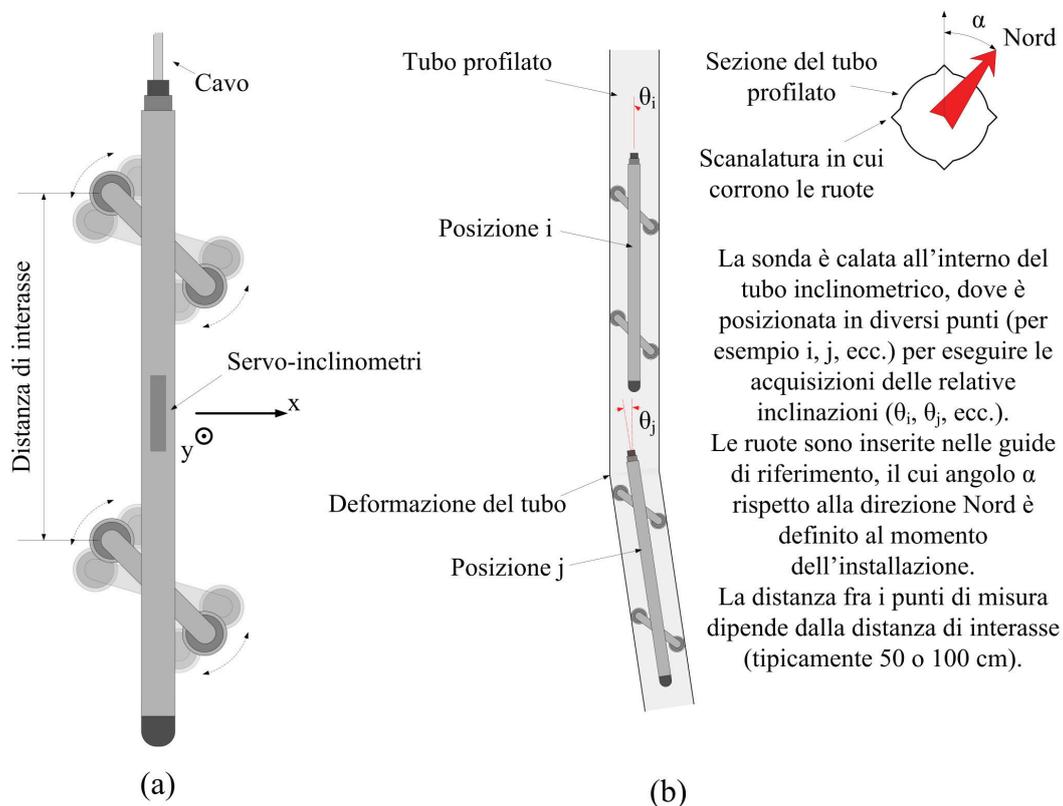


Figura 1: (a) disegno di una sonda inclinometrica utilizzata per monitorare l’evoluzione dei fronti franosi; (b) esempio del funzionamento di una di queste sonde all’interno di una perforazione.

Come si vede dalla Figura 1, il carrello è costituito da due braccia mobili, dotate di ruote alle estremità. Esse sono collegate al corpo centrale tramite un perno e, mantenute da una molla nella posizione di massima estensione, sono capaci di ruotare di un angolo limitato. All'interno del corpo centrale sono collocati i servo-inclinometri, con gli assi sensibili orientati come nella figura 1a. Le perforazioni per il monitoraggio delle frane sono attrezzate con un tubo profilato, come quello illustrato nella Figura 1b. Al momento dell'installazione, si misura l'angolo α formato dalle scanalature del tubo con la direzione Nord (Figura 1b), in modo da fornire un riferimento per le misure. Quando la sonda è inserita nel tubo inclinometrico, le sue ruote sono collocate all'interno delle guide in modo che gli inclinometri siano orientati lungo le direzioni indicate dalle scanalature del tubo: conoscendo l'angolo α fra queste e le direzioni Nord-Sud e Est-Ovest, è possibile orientare il profilo inclinometrico che si costruisce con le misure rispetto ai punti cardinali.

Per ricostruire la deformazione del tubo (ASTM, 1993) si misura l'inclinazione della sonda inclinometrica sui due assi x e y indicati nella Figura 1a. Rilevando tali valori a intervalli di profondità regolari definiti dalla distanza di interasse (Figura 1a), si può costruire la "deformata", cioè una spezzata che approssima la forma del tubo. I segmenti di tale spezzata hanno inclinazione fornita dai valori suddetti e lunghezza pari alla distanza fra i punti di misura. Minore è la distanza fra essi, maggiori sono l'accuratezza con cui si può ricostruire il profilo del tubo inclinometrico e il tempo necessario per l'intera operazione. In genere le acquisizioni sono eseguite a distanza di 0.5-1 m fra loro e la profondità si misura tramite apposite tacche presenti sul cavo che regge la sonda. Poiché gli assi di riferimento sono due (x e y), per ogni punto di misura si hanno due valori dell'inclinazione e, perciò, al termine delle acquisizioni si ricavano due serie di dati, che indichiamo con $X = [x_0, \dots, x_N]$ e $Y = [y_0, \dots, y_N]$, dove $N + 1$ è il numero dei punti di misura: la serie X

corrisponde alle inclinazioni rispetto all'asse x ; la serie Y indica le inclinazioni rispetto all'asse y .

Il primo punto di misura è quello a maggiore profondità e le acquisizioni si svolgono come segue: inizialmente la sonda è calata sul fondo della perforazione, dove è lasciata per il tempo necessario a stabilizzarne la temperatura; quando ciò è avvenuto, si memorizza il valore d'inclinazione fornito dallo strumento e si colloca la sonda nel punto di misura successivo (a minore profondità del precedente); per ognuno di questi punti si deve attendere la stabilizzazione del valore fornito e successivamente si può procedere memorizzando il dato e passando alla posizione seguente.

Per eliminare eventuali errori sistematici della misura si esegue una seconda serie di acquisizioni che si svolge allo stesso modo della precedente, ma ruotando di 180° la sonda inclinometrica: questa operazione coincide con l'inversione del verso degli assi x e y degli inclinometri rispetto alle guide della perforazione e, al termine delle acquisizioni, si ottengono due serie di dati che indichiamo con $X' = [x'_0, \dots, x'_N]$ e $Y' = [y'_0, \dots, y'_N]$, dove N è il numero dei punti di misura.

Per comprendere il vantaggio della misura con il carrello ruotato, supponiamo che durante le acquisizioni sia presente un errore sistematico δ_x sulle misure dell'asse x e uno δ_y su quelle dell'asse y : essi, possono essere dovuti, per esempio, a un offset nell'inclinazione della sonda o a errori dovuti alla geometria del sistema, e si sommano al valore reale dell'inclinazione. In questo modo, ogni dato d'inclinazione memorizzato durante la prima misura sarà del tipo:

$$I_{x,0^\circ} = X + \delta_x = [x_0 + \delta_x, \dots, x_i + \delta_x, \dots, x_N + \delta_x]$$

e

$$I_{y,0^\circ} = Y + \delta_y = [y_0 + \delta_y, \dots, y_i + \delta_y, \dots, y_N + \delta_y]$$

dove x_i e y_i corrispondono ai valori corretti dell'inclinazione per il punto di misura i -esimo, rispetto alle direzioni x e y . Analogamente, i

dati raccolti durante le misure con la sonda ruotata di 180° (cioè con il verso degli assi invertito), saranno del tipo:

$$I_{x,180^\circ} = X' + \delta_x = -X + \delta_x = [-x_0 + \delta_x, \dots, -x_i + \delta_x, \dots, -x_N + \delta_x]$$

e

$$I_{y,180^\circ} = Y' + \delta_y = -Y + \delta_y = [-y_0 + \delta_y, \dots, -y_i + \delta_y, \dots, -y_N + \delta_y]$$

dove $x'_i = -x_i$ e $y'_i = -y_i$ indicano la reale inclinazione per il punto di misura i -esimo, rispetto alle direzioni x e y , quando la sonda è ruotata di 180°.

Il valore corretto dell'inclinazione in ciascun punto di misura è quindi dato da:

$$I_x = \frac{I_{x,0^\circ} - I_{x,180^\circ}}{2} = \frac{X + \delta_x - (X' + \delta_x)}{2} = \frac{X + \cancel{\delta_x} + X - \cancel{\delta_x}}{2} = X \quad (3.1)$$

per l'asse x , e

$$I_y = \frac{I_{y,0^\circ} - I_{y,180^\circ}}{2} = \frac{Y + \delta_y - (Y' + \delta_y)}{2} = \frac{Y + \cancel{\delta_y} + Y - \cancel{\delta_y}}{2} = Y \quad (3.2)$$

per l'asse y . Calcolando termine a termine la semidifferenza fra la serie di dati raccolta nella prima fase di acquisizione e la serie ottenuta con la sonda inclinometrica ruotata di 180° si riescono ad eliminare dai dati gli errori δ_x e δ_y , che indicano lo scarto della misura e possono essere calcolati come segue:

$$\frac{I_{x,0^\circ} + I_{x,180^\circ}}{2} = \frac{X + \delta_x + (X' + \delta_x)}{2} = \frac{\cancel{X} + \delta_x + \cancel{X} + \delta_x}{2} = \delta_x \quad (3.3)$$

per l'asse x , e

$$\frac{I_{y,0^\circ} + I_{y,180^\circ}}{2} = \frac{Y + \delta_y + (Y' + \delta_y)}{2} = \frac{\cancel{Y} + \delta_y + \cancel{Y} + \delta_y}{2} = \delta_y \quad (3.4)$$

per l'asse y . È importante evidenziare che per δ_x e δ_y , ci si aspettano valori pressoché costanti, proprio perché è ragionevole pensare che un eventuale offset sull'inclinazione, dovuto alla geometria del sistema, si mantenga costante per tutta la misura.

Al momento dell'installazione del tubo inclinometrico è impossibile ottenere la perfetta linearità e verticalità della perforazione, quindi, occorre determinare il profilo iniziale del tubo, tramite una prima

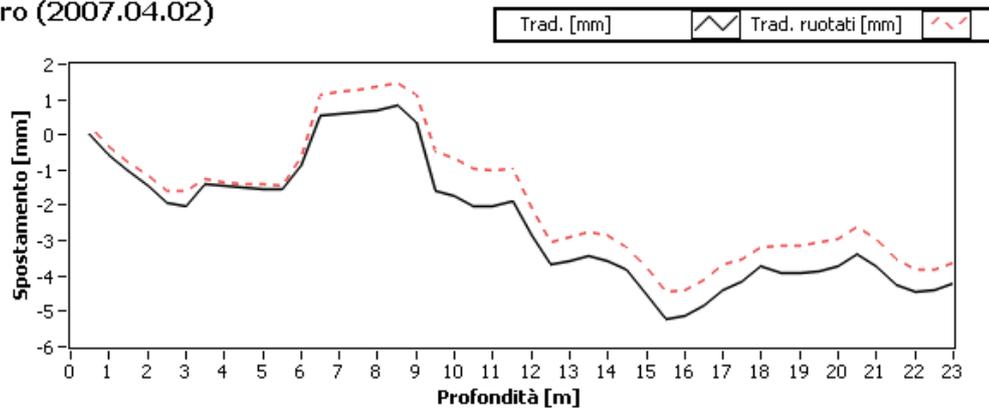
misura dell'inclinazione, che funge da “zero” per quelle successive: i valori di questa prima misura devono sempre essere sottratti a quelli ricavati nelle successive campagne di rilevamento, al fine di valutare la deformazione del tubo dovuta al movimento della frana escludendo il profilo iniziale.

I test di confronto sono stati svolti in collaborazione con i geologi del Servizio Lavori Speciali Opere pubbliche della Provincia di Modena, che ci hanno messo a disposizione il sito di misura sulla frana della Biricuccola, nell'Appennino modenese, e la strumentazione da loro normalmente utilizzata per queste misure. Le campagne di misura sono state due: la prima il 27 Febbraio 2009 e la seconda il 27 Ottobre 2009. In entrambi i casi, abbiamo eseguito i test installando il nostro inclinometro su uno strumento di riferimento: sonda inclinometrica commerciale prodotta da Sisgeo, tipo S060041 (con risoluzione di 0.01 mm per 500 mm, equivalente a $2 \cdot 10^{-5}$ rad), associata alla centralina ARCHIMEDE (n. matricola 20060398). Fissando il nostro sensore al carrello della sonda inclinometrica “*tradizionale*”, abbiamo potuto eseguire le misure d'inclinazione simultaneamente allo strumento di riferimento. Il sondaggio raggiunge 23 m di profondità e in entrambi i test, le misure sono effettuate ogni 50 cm (per via del passo fra le ruote del carrello).

Di seguito si presentano i risultati ottenuti con il nostro sistema, affiancati a quelli ricavati dall'elaborazione dei dati “grezzi”, forniti dalla sonda di riferimento. Per ciascuna delle campagne di misura si mostrano, per entrambi i sistemi, i dati risultanti dai vari passaggi che portano alla ricostruzione del profilo del tubo inclinometrico. Poiché esso è stato installato prima (2 Aprile 2007) della nostra campagna iniziale, abbiamo utilizzato i dati raccolti durante la misura dello “zero” eseguita al momento dell'installazione del tubo profilato, mediante la sonda che fa da riferimento per i nostri test. Tramite le formule precedentemente riportate, è possibile ricavare le inclinazioni I_x e I_y dai dati raccolti al momento della messa in opera del tubo inclinometrico. Una prima elaborazione di questi valori, che tiene

conto della distanza fra i punti di acquisizione, consente di fornire lo spostamento in termini differenziali¹, come mostrato nella Figura 2. In entrambi i grafici, l'asse x indica la profondità cui è stata eseguita la misura e l'asse y rappresenta lo spostamento locale (in mm) dallo zero: nel primo grafico, lungo la direzione x della sonda inclinometrica; nel secondo, lungo la direzione y .

Spostamento differenziale - N-S -
zero (2007.04.02)



Spostamento differenziale - E-O -
zero (2007.04.02)

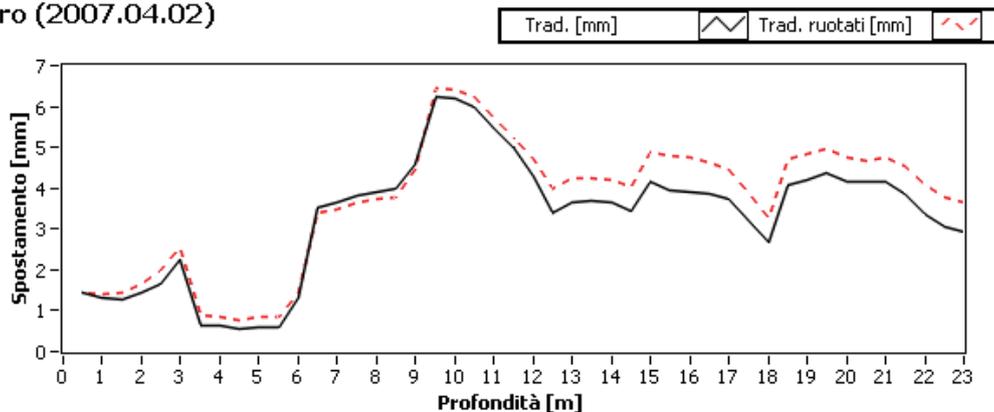


Figura 2: Grafico che rappresenta gli spostamenti differenziali misurati al momento dell'installazione del tubo inclinometrico. Le curve in nero rappresentano i dati, senza tenere conto dell'angolo α fra la direzione individuata dal profilo del tubo inclinometrico e la direzione Nord. Le curve in rosso invece, rappresentano gli stessi dati, dopo aver eseguito una rotazione di un angolo α , che in questo caso è di 10° .

Nei grafici della Figura 2 si vuole evidenziare l'operazione che permette di allineare i due assi della sonda inclinometrica con le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest. Essa corrisponde a una rotazione dei dati, nel piano xy , che deve essere sempre eseguita per riferire gli

¹ Lo spostamento differenziale è ottenuto moltiplicando il seno dell'angolo misurato in quella posizione per la distanza fra i punti di misura. Ogni spostamento differenziale è indicativo solo del punto cui fa riferimento, mentre lo spostamento integrale tiene conto di tutti i contributi.

spostamenti del fronte della frana alle direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest. La serie di valori I_x e I_y , con riferimento a (3.1) e (3.2), identificati dalla linea continua (“Trad. [mm]”), rappresenta i dati prima della rotazione, mentre la serie indicata dalla linea tratteggiata (“Trad. ruotati [mm]”), rappresenta i dati dopo la rotazione dell’angolo $\alpha = 10^\circ$. L’abbreviazione “Trad.”, utilizzata in questi grafici, è adottata anche in seguito nel capitolo, per indicare i dati acquisiti con la sonda inclinometrica “*tradizionale*”. Da notare, che è corretto parlare di spostamento N-S o E-O solo se si considerano le serie di dati dopo aver applicato la rotazione: nel seguito di questa trattazione, tale operazione è eseguita per ogni gruppo di dati, così da poter fare sempre riferimento alle direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest.

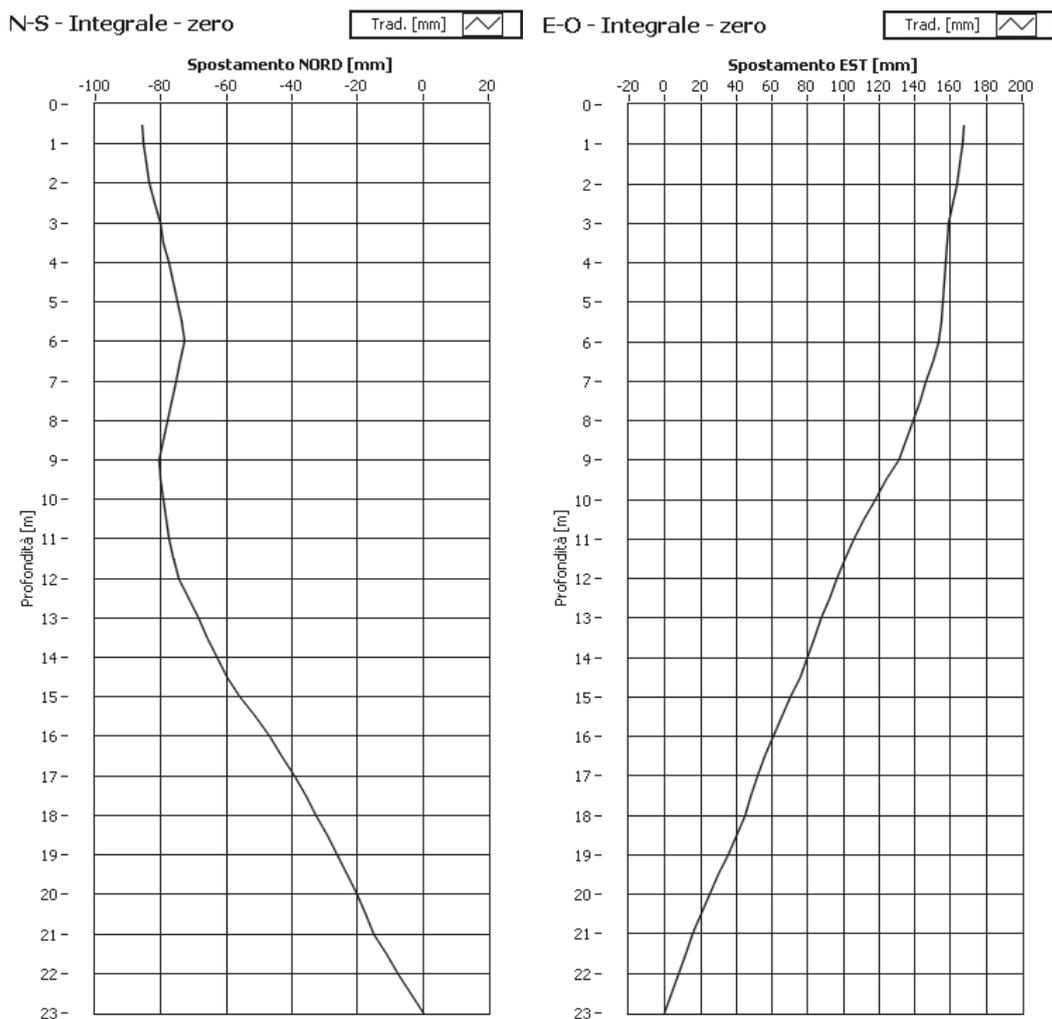


Figura 3: Rappresentazione integrale del profilo del tubo inclinometrico al momento dell’installazione, sulle due direzioni N-S ed E-O.

Integrando i dati rappresentati nei grafici della Figura 2 si ottiene lo spostamento risultante da tutti i contributi puntuali, per entrambe le direzioni d'interesse, come mostrato nei grafici della Figura 3. In questo caso, la profondità è indicata sull'asse y , e lo spostamento su x , allo scopo di rendere una rappresentazione più immediata del tubo all'interno del terreno. Queste deformate, che si riferiscono al momento della messa in opera, evidenziano uno spostamento massimo di circa 80 e 170 mm, rispettivamente verso Sud e Est. Come già detto, è fondamentale conoscere quest'informazione per riuscire in seguito a valutare la deformazione dovuta al movimento della frana, indipendentemente dalla configurazione iniziale del tubo inclinometrico.

3.1.1. Risultati del 27 febbraio 2009

La prima analisi comparativa riguarda la campagna di misura del 27 febbraio 2009. Come già detto, il tubo inclinometrico su cui abbiamo eseguito i test raggiunge la profondità di 23 m e le misure sono state eseguite simultaneamente con la sonda inclinometrica di riferimento e un inclinometro, basato su accelerometro MEMS, analogo a quelli impiegati nel sistema di nostra realizzazione e descritto nel capitolo 1.

In questo caso, i test eseguiti non servono alla verifica del metodo di misura con gli *aghi* fissi nel terreno, ma hanno lo scopo di confrontare la sensibilità e precisione degli inclinometri, da noi realizzati utilizzando sensori MEMS, rispetto a una sonda inclinometrica commerciale, presa come riferimento. Questa prima verifica è il punto di partenza fondamentale, per la successiva valutazione del sistema *fisso*, descritto nel capitolo 1.

Per eseguire questo confronto, abbiamo comunque utilizzato l'elettronica d'interfaccia del sistema *fisso*, con la differenza che, invece di sfruttare la comunicazione tramite modem GPRS, abbiamo collegato la *scheda di alimentazione* (cfr. cap. 1, pag. 25) del sistema

direttamente alla porta seriale (RS-232) di un computer portatile. Inoltre, invece di utilizzare più sensori, che nel sistema descritto nel capitolo 1 sono solidali ai segmenti di un *ago* metallico snodato, ne abbiamo impiegato uno solo, chiuso ermeticamente all'interno di un contenitore in PVC (di quelli impiegati nel sistema *fisso*). Il sensore, come si vede nella Figura 4, è collegato a un normale cavo seriale raccolto su un avvolgicavo e, durante i test, è stato rigidamente fissato in fondo al carrello della sonda inclinometrica di riferimento.



Figura 4: Immagini dell'avvolgicavo e del contenitore ermetico che racchiude l'inclinometro utilizzato per i test di confronto con la sonda inclinometrica di riferimento.

I grafici che seguono mostrano i risultati ottenuti dall'elaborazione e confronto dei dati raccolti con le due sonde inclinometriche. Abbiamo elaborato i dati "grezzi" che la sonda Sisgeo permette di esportare, e che comprendono già la correzione di temperatura. Abbiamo trasformato le letture dei livelli di tensione, prima in valori angolari e, in seguito, in spostamenti. La stessa operazione è stata eseguita con i dati forniti dal nostro sistema di misura: in questo caso però la correzione della deriva termica è stata eseguita in seguito, via software. Nei calcoli si è anche tenuto conto della variazione di tensione, alla luce delle considerazioni fatte nel capitolo 2 riguardo il comportamento raziometrico dei sensori.

Nella Figura 5 sono rappresentati e messi a confronto nello stesso grafico i dati ottenuti con le due sonde lungo le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest. Le operazioni eseguite sui dati prima di inserirli nei grafici sono le seguenti:

- i valori in tensione forniti dai due strumenti sono stati convertiti in angoli (espressi in radianti) e quindi, tramite le formule (3.1) e (3.2), si sono calcolate le corrette inclinazioni I_x e I_y ;
- tenendo conto della distanza fra i punti di misura (0.5 m), si sono ricavati gli spostamenti differenziali, espressi in mm;
- è stata eseguita la rotazione dei dati di un $\alpha = 10^\circ$, nel piano xy individuato dagli assi degli inclinometri, per riferire le misure alle direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest;
- ai dati ottenuti dai precedenti passaggi sono stati sottratti i valori che compaiono nei grafici della Figura 2, che rappresentano lo “zero” del sistema.

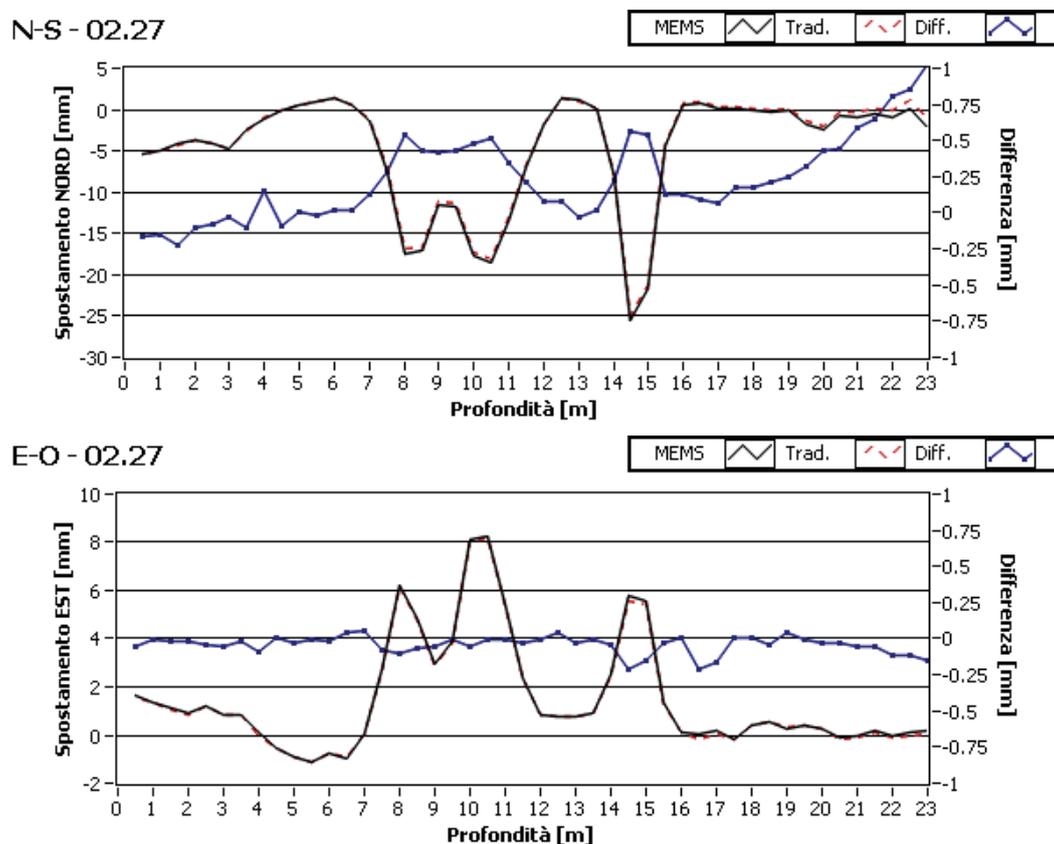


Figura 5: Grafici degli spostamenti differenziali (in mm), lungo le due direzioni di riferimento per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa tratteggiata). Poiché i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (curva blu continua, con markers) che rappresenta la differenza fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sulla destra del grafico. In questo caso non sono presenti correzioni sui dati acquisiti dall’inclinometro MEMS.

Come si vede dai grafici nella Figura 5, i valori degli spostamenti differenziali ottenuti con i due inclinometri sono molto simili, per cui, nel grafico è indicata anche la differenza fra le due curve (linea blu), per la quale, valor medio \bar{D} e deviazione standard σ_D , sono:

$$\bar{D}_{N-S} = 0.24 \text{ mm}, \quad \sigma_{D,N-S} = 0.29 \text{ mm} \text{ per la direzione Nord-sud e}$$

$$\bar{D}_{E-O} = -0.04 \text{ mm}, \quad \sigma_{D,E-O} = 0.06 \text{ mm per Est-Ovest.}$$

Oltre ai grafici degli spostamenti differenziali, è interessante osservare anche l'andamento dell'offset, o scarto della misura, che si ottiene dalle relazioni (3.3) e (3.4). Esso è rappresentato, per le due direzioni di riferimento, nei grafici della Figura 6.

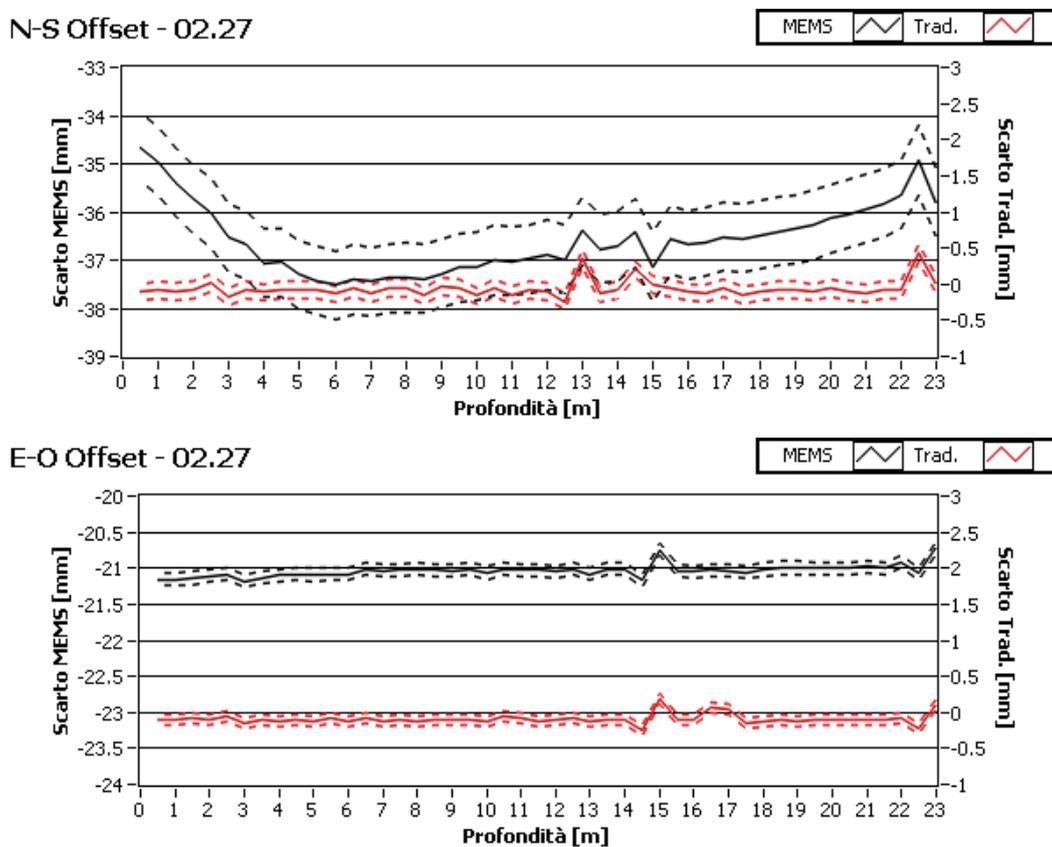


Figura 6: Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm), lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l'altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

Le curve in nero sono calcolate dai valori acquisiti dall'inclinometro basato su sensore MEMS, mentre quelle in rosso riguardano il servo-

inclinometro di riferimento. Le curve tratteggiate sono ottenute da quelle continue, sommando e sottraendo loro il valore della deviazione standard, calcolata sull'offset della misura: per quanto riguarda il grafico riferito alla direzione Nord-Sud, la deviazione standard per la sonda MEMS è $\sigma_{N-S, MEMS} = 0.71$ mm, mentre quella per la sonda "tradizionale" è $\sigma_{N-S, Trad.} = 0.12$ mm; nel grafico relativo alla direzione Est-Ovest invece le deviazioni standard per i due tipi di sonda sono $\sigma_{E-O, MEMS} = 0.09$ mm e $\sigma_{E-O, Trad.} = 0.07$ mm.

L'offset indicato nei grafici della Figura 6 rappresenta l'errore che si commetterebbe se non si calcolassero i valori delle inclinazioni (o degli spostamenti) tramite la semidifferenza delle misure, eseguite ruotando di 180° il carrello dell'inclinometro. Tal errore è dovuto alla geometria della sonda e quindi ci si aspetta che sia costante durante la misura. I picchi presenti sono giustificati dal fatto che non vi è simmetria delle ruote rispetto al corpo centrale del carrello (si veda la Figura 1a), per cui, quando la sonda è ruotata di 180° e ripercorre il tubo profilato, fermandosi negli stessi punti in cui è stata eseguita la misura prima della rotazione, le ruote non si trovano nella stessa posizione. Nel caso ideale di un tubo senza curvature e irregolarità, questa variazione nella posizione delle ruote del carrello prima e dopo la rotazione, non produrrebbe alcun errore; nel caso reale, invece, essa è la causa dei picchi presenti nell'offset dei due sensori.

I valori della deviazione standard indicati in precedenza sono minori per la sonda di riferimento, per la quale, si nota che la deviazione è maggiore sui dati che riferiscono alla direzione Nord-Sud, proprio perché i movimenti di maggior entità della frana avvengono lungo questa direzione. Per quanto detto riguardo alle cause dell'offset, è ragionevole pensare che una maggiore deformazione del tubo porti a un aumento dell'ampiezza dei picchi, che influiscono sul valore della deviazione standard.

Da questi grafici si possono inoltre notare due particolari importanti:

- a parte alcuni punti, in cui si osservano brusche variazioni, l'offset sulle misure della sonda inclinometrica di riferimento (in rosso) è costante;
- lo scarto sulle misure eseguite con la sonda MEMS (in nero) non è costante e ha a sua volta dei picchi, molti dei quali si trovano in corrispondenza di quelli presenti nella curva relativa all'inclinometro "tradizionale" (in rosso). Inoltre, poiché la sonda MEMS e il carrello inclinometrico non sono perfettamente in linea, i valori dell'offset non sono nell'intorno dello zero, come nel caso dell'inclinometro di riferimento. Questo particolare non inficia il risultato delle misure poiché esse si basano su variazioni dell'inclinazione, che sono quindi indipendenti dall'orientamento iniziale.

Quest'ultima affermazione si ricollega al discorso della deviazione standard, il cui valore è maggiore nel caso della sonda basata su MEMS. In questo caso però, almeno per quanto concerne il grafico Nord-Sud, non è l'ampiezza dei picchi a influenzare maggiormente la deviazione, ma l'intervento di altri fattori che andiamo ora a descrivere.

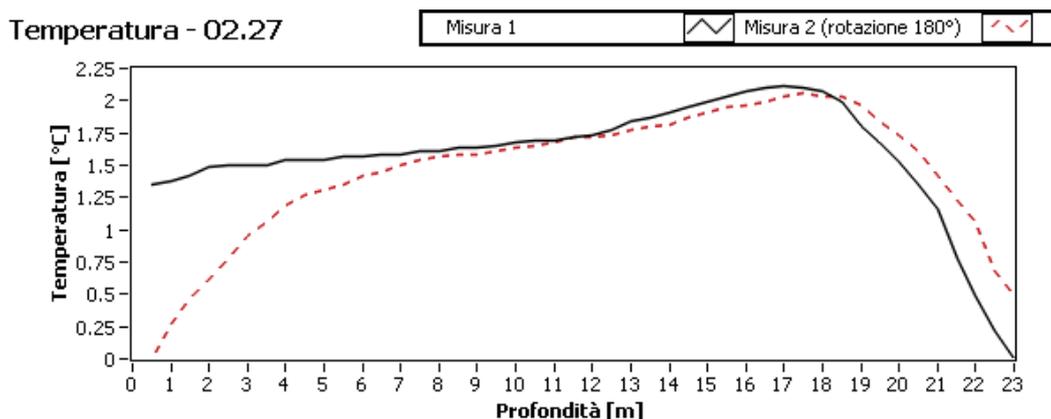


Figura 7: Variazione della temperatura durante le acquisizioni: nel caso della Misura 1, l'asse x dell'inclinometro (vedi Figura 1a) è diretto verso Nord ; nel caso della Misura 2, invece, verso sud.

Nei capitoli precedenti è stato affrontato il problema della deriva termica, che influisce sull'uscita del sensore MEMS. A tal proposito, l'inclinometro da noi realizzato è dotato di un misuratore di

temperatura. La variazione di quest'ultima, per il test in esame, è mostrata nella Figura 7, dove le due curve si riferiscono alle acquisizioni con il carrello non ruotato (Misura 1) e dopo la rotazione di 180° del medesimo (Misura 2).

La variazione della temperatura induce un cambiamento del livello di zero dell'accelerometro MEMS sui tre assi. L'asse z del sensore, che in questo caso coincide con l'asse x della Figura 1a (e quindi è diretto lungo la direzione Nord-Sud), risente maggiormente della temperatura rispetto all'altro asse impiegato nella misura. Ciò è confermato dal valore della deviazione standard ($\sigma_{N-S, MEMS}$) che è maggiore per quest'asse. Inoltre, nei grafici della Figura 6, si vede che l'effetto della temperatura è più rilevante nel primo, che riguarda appunto la direzione Nord-Sud.

Ogni asse dell'accelerometro MEMS ha un proprio coefficiente, esprimibile in mV/°C, che indica il cambiamento del livello di zero del sensore in funzione della temperatura, per quel particolare asse. Essa, influenza anche la sensibilità del trasduttore ma, tale effetto, è trascurabile rispetto a quello appena citato.

Per correggere i dati riguardanti un determinato asse, occorre utilizzare la seguente procedura:

- si moltiplica il relativo coefficiente per i valori di temperatura riportati nelle curve del grafico in Figura 7. In questo modo si ottengono due insiemi di valori che rappresentano (in mV) la variazione dello zero del sensore, per la prima e la seconda misura (rotazione di 180°);
- i dati ottenuti nel passaggio precedente devono essere sommati ai corrispondenti valori non raziometrici (quindi ancora espressi in mV) dell'accelerazione nei diversi punti di misura. Questa operazione corrisponde a una variazione dello zero del sensore.

Nella Figura 8 si possono vedere i grafici riguardanti l'offset, dopo la correzione della deriva termica. La deviazione standard relativa alla direzione Nord-Sud è ora $\sigma_{N-S, MEMS} = 0.17$ mm, mentre, per la direzione Est-Ovest il valore è immutato.

I coefficienti utilizzati per questa correzione, che erano stati determinati sperimentalmente, sono stati adattati in modo da ottenere un valore dell'offset prossimo a una costante, con l'eccezione delle posizioni in cui si presentano i picchi. Tale decisione è stata presa perché si ritiene più corretto questo approccio per correggere il comportamento del sensore al variare della temperatura.

Introduciamo un'ulteriore correzione basata sulla variazione della tensione d'alimentazione, che influisce sull'uscita del sensore, causando variazioni nel livello di zero. Osservando i grafici nella Figura 8, infatti, si può notare la presenza di una leggera tendenza nell'offset del sensore MEMS.

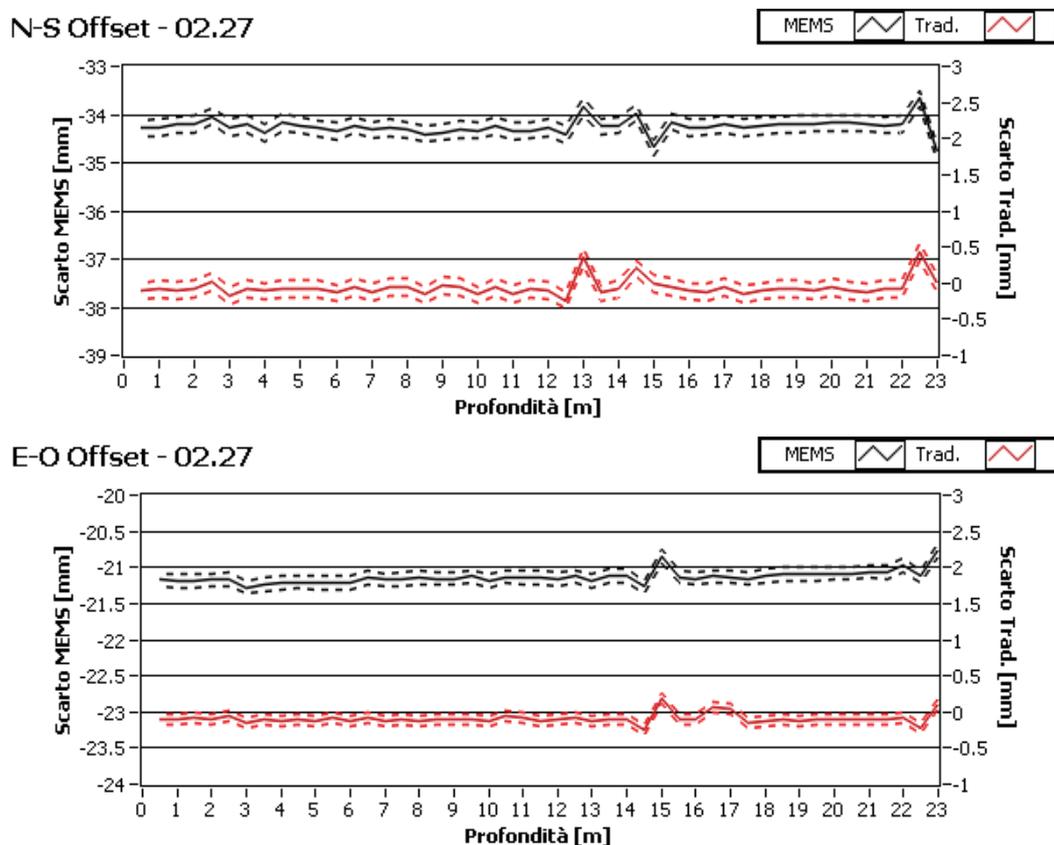


Figura 8: Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm) lungo le due direzioni di riferimento, dopo la correzione della deriva termica, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l'altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

In questo caso abbiamo scelto di definire empiricamente un coefficiente, da moltiplicare per i valori delle tensioni mostrati nel

grafico in Figura 9. Così si ottengono due curve di correzione che tengono conto dell'andamento della tensione d'alimentazione durante le misure.

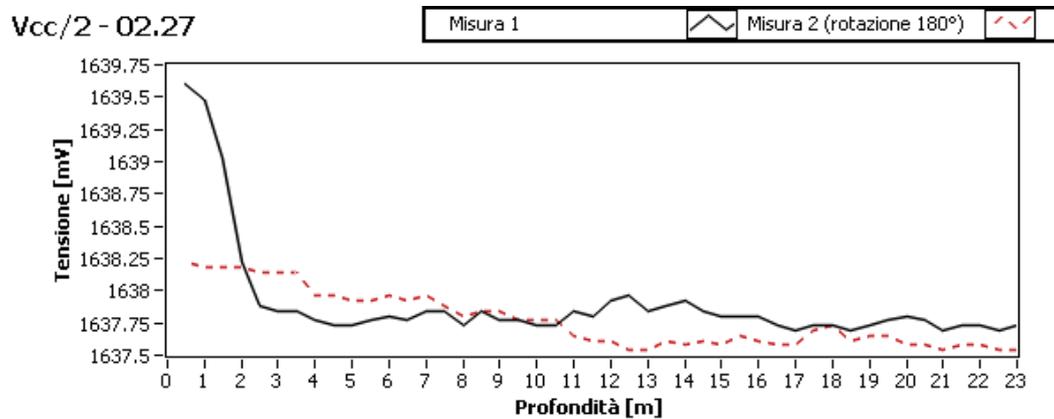


Figura 9: Valori della Vcc/2 durante le due misure.

Il risultato della correzione è rappresentato nei grafici della Figura 10, dove l'offset è espresso in funzione della profondità, per entrambe le direzioni d'interesse, dopo aver applicato le correzioni della deriva termica e della tensione d'alimentazione. La deviazione standard per la direzione Nord-Sud è rimasta invariata, mentre per Est-Ovest abbiamo che $\sigma_{E-O, MEMS} = 0.07 \text{ mm}$.

Nel confronto fra i due sensori, per l'offset nella versione corretta (Figura 10), si nota che fra i dati c'è un ottimo accordo. Poiché la presenza dei picchi è dovuta alle caratteristiche geometriche del sistema di misura e dipende dalle deformazioni del tubo profilato, il fatto che l'offset per i sensori abbia lo stesso andamento, costituisce un primo risultato positivo per il test di verifica del nostro inclinometro.

Infatti, confrontando le curve riferite al sensore MEMS con quelle della sonda Sisgeo, si nota che, in prima approssimazione, i picchi si trovano collocati negli stessi punti e hanno ampiezze uguali.

Poiché l'ampiezza dei picchi, che è rappresentativa dell'errore dovuto all'asimmetria del sistema di misura, è inferiore al millimetro, un accordo fra i dati delle due sonde indica che il sensore MEMS si avvicina ai risultati dell'inclinometro servo-meccanico, anche per

misure di spostamenti molto piccoli. Le differenze, che comunque esistono, sono dovute al fatto che l'inclinometro MEMS, per questi valori, si trova prossimo al limite della sua sensibilità.

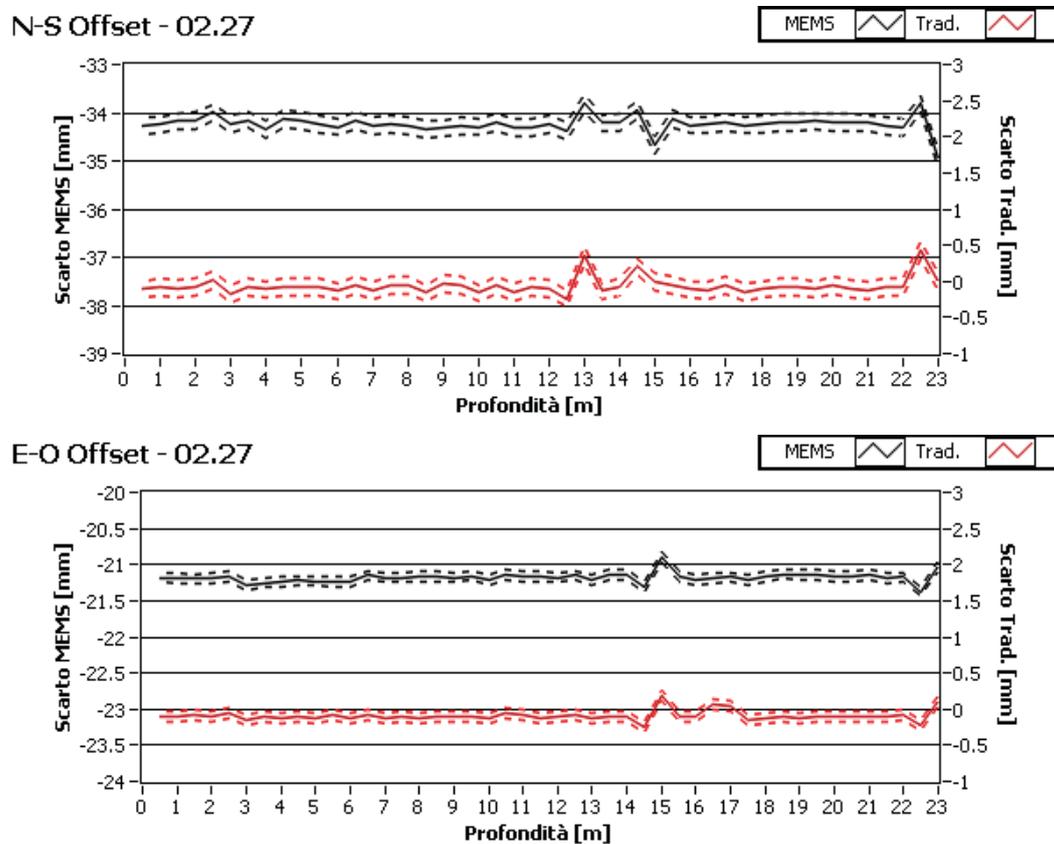


Figura 10: Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm) lungo le due direzioni di riferimento, dopo la correzione della deriva termica e della tensione d'alimentazione, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l'altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

I grafici nella Figura 11 mostrano lo spostamento differenziale in funzione della profondità per le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest per le due sonde confrontate, dopo l'applicazione delle correzioni alle curve in Figura 5. Come nei grafici della Figura 5, la curva in blu indica lo scostamento, espresso in mm, fra i risultati ottenuti con i due inclinometri. Il valor medio e la deviazione standard, calcolati sulla differenza fra le curve corrette, sono: $\bar{D}_{N-S} = 0.11 \text{ mm}$, $\sigma_{D,N-S} = 0.17 \text{ mm}$ per la direzione Nord-sud e $\bar{D}_{E-O} = -0.02 \text{ mm}$, $\sigma_{D,E-O} = 0.09 \text{ mm}$ per Est-Ovest. L'accordo fra le due curve è

aumentato in maniera considerevole (di circa un fattore 2 sulla deviazione standard) lungo la direzione Nord-Sud, mentre è diminuita leggermente sull'altro asse di riferimento.

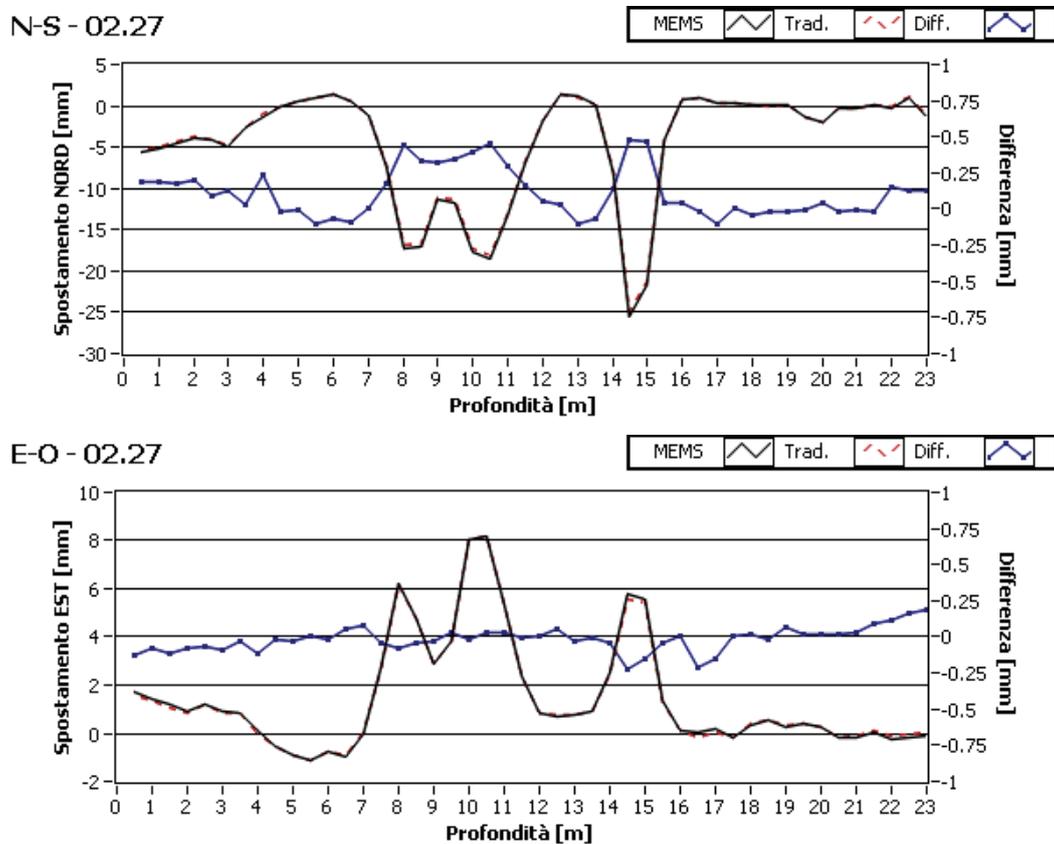


Figura 11: Grafici degli spostamenti differenziali (in mm) dopo le correzioni, lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa tratteggiata). Poiché i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (curva blu continua, con markers) che rappresenta la differenza fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sulla destra del grafico.

Il “peggioramento” dei dati lungo questa direzione è accettabile, poiché le correzioni non sono state introdotte per minimizzare la differenza fra le due curve, ma per ottenere un andamento costante da parte dell’offset, partendo dai valori ricavati sperimentalmente per le caratteristiche del sensore.

Questa prova, infatti, non ha lo scopo di calibrare il nostro sistema in base ai risultati della sonda di riferimento, ma di confrontare le curve ricavate con l’inclinometro MEMS, dopo avere eseguito una taratura in laboratorio e basandosi su dati svincolati dall’altra sonda, come per esempio l’andamento dell’offset.

Per completare il confronto fra le misure abbiamo calcolato gli spostamenti integrali sulle direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest, e li abbiamo rappresentati nei grafici della Figura 12, dove è presente anche la differenza percentuale fra i risultati ottenuti con le due sonde inclinometriche.

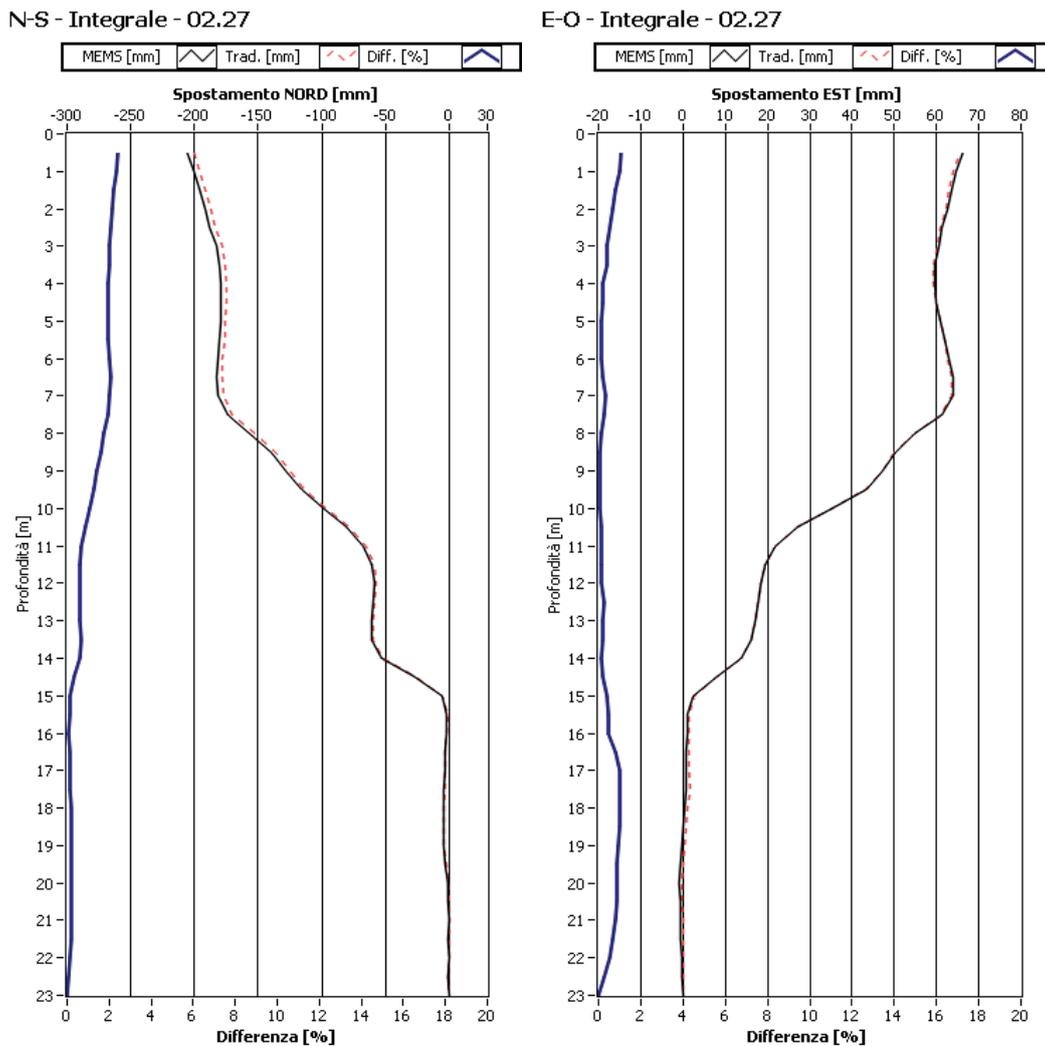


Figura 12: Grafici degli spostamenti integrali (in mm) dopo le correzioni, lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa tratteggiata). Poiché i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (blu, continua) che rappresenta la differenza percentuale fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sul fondo del grafico.

Osserviamo che vi è un ottimo accordo fra i dati, con differenze sotto il 3% nel primo grafico e inferiori al 2% nel secondo. Notiamo che, essendo $\bar{D}_{N-S} = 0.11$ mm, il nostro sensore tende a sovrastimare leggermente le inclinazioni lungo quest’asse. Ciò non si traduce in un

costante aumento della differenza percentuale nel primo grafico della Figura 12, perché la deviazione standard, $\sigma_{D,N-S} = 0.17$ mm, è maggiore del valore della media e quindi le oscillazioni della differenza portano ad avere anche contributi negativi (inclinazioni sottostimate). Lo spostamento della frana, il cui fronte si muove complessivamente verso Sud-Est, è maggiore lungo la direzione Nord-Sud: fra il punto fisso sul fondo della perforazione e la superficie vi è uno spostamento di circa 200 mm. In questo caso, la discrepanza fra le curve nel punto a minore profondità è di circa 5 mm. Analogamente, lungo la direzione Est-Ovest lo spostamento totale è di circa 65 mm, con una differenza inferiore al millimetro, nel punto più vicino alla superficie (0.5 m di profondità).

Si noti inoltre che il nostro sistema descrive in maniera corretta il profilo delle superfici di slittamento della frana, che sono localizzate in corrispondenza dei picchi presenti nelle curve che raffigurano lo spostamento differenziale.

3.1.2. Risultati del 27 ottobre 2009

Il 27 ottobre 2009 abbiamo compiuto una seconda comparazione fra le sonde inclinometriche. Le misure, come nella precedente campagna, sono state eseguite sulla frana della Biricuccola, in collaborazione con i geologi della Provincia di Modena. Durante questo test abbiamo applicato lo stesso metodo di confronto impiegato a Febbraio, ma abbiamo utilizzato un altro sensore. La sostituzione dell'inclinometro è stata eseguita allo scopo di rendere più indicativi i risultati finali dei test, dando loro un carattere più generale riguardo l'impiego dei sensori MEMS per la realizzazione di sonde inclinometriche.

Rimangono valide tutte le considerazioni espresse dall'inizio del paragrafo riguardo alla misura dello zero, che è evidentemente la stessa, e la rotazione degli assi per riferire i risultati alle direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest.

Procediamo seguendo la falsa riga del sottoparagrafo precedente e, nella Figura 13, riportiamo i grafici degli spostamenti differenziali sulle due direzioni di riferimento, in funzione della profondità.

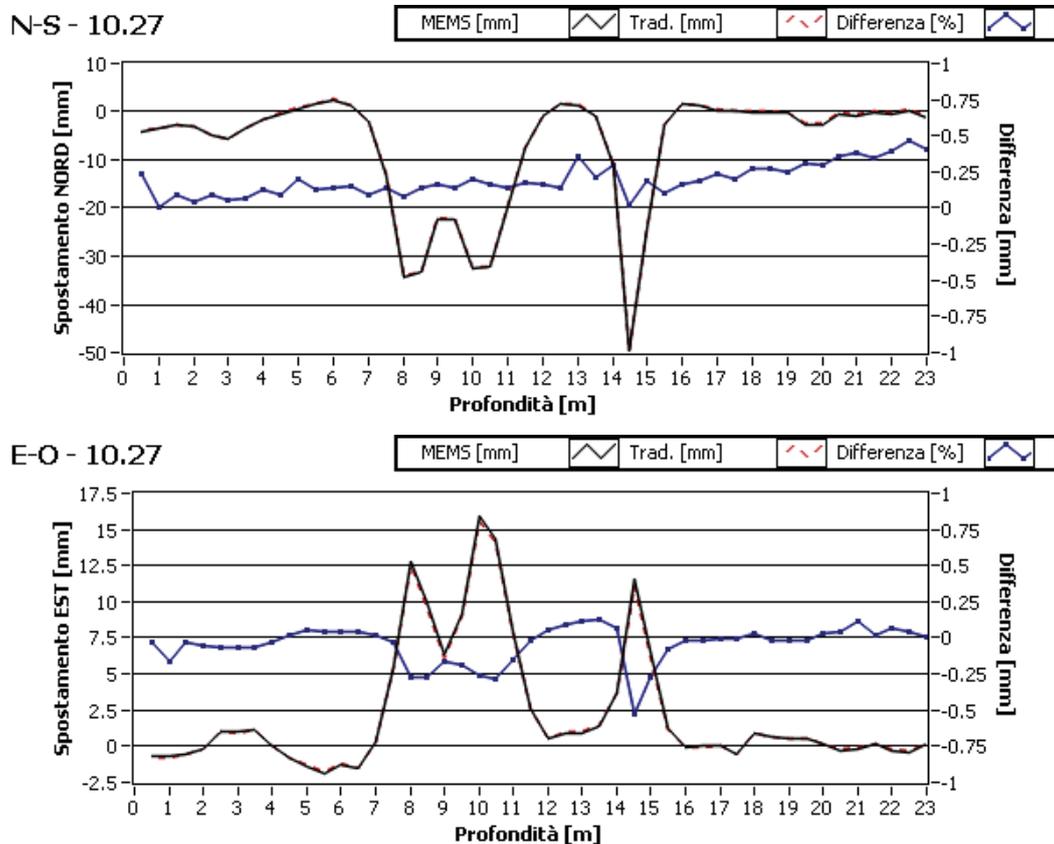


Figura 13: Grafici degli spostamenti differenziali (in mm), lungo le due direzioni di riferimento per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa tratteggiata). Poiché i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (curva blu continua, con markers) che rappresenta la differenza fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sulla destra del grafico. In questo caso non sono presenti correzioni sui dati acquisiti dall’inclinometro MEMS.

Come per il test precedente, le curve hanno un andamento simile e, per rendere visibile e quantificabile la diversità fra i loro valori, si è introdotta una terza curva (in blu) che rappresenta la differenza fra le due curve dello spostamento differenziale. Calcolando media e deviazione standard sui valori di tale curva, per entrambi i grafici, si ottiene: $\bar{D}_{N-S} = 0.19 \text{ mm}$, $\sigma_{D,N-S} = 0.11 \text{ mm}$ per la direzione Nord-sud e $\bar{D}_{E-O} = -0.05 \text{ mm}$, $\sigma_{D,E-O} = 0.13 \text{ mm}$ per Est-Ovest.

Nella Figura 14 ci sono i grafici inerenti l’offset delle misure prima dell’applicazione delle correzioni su temperatura e tensione. Da essi si

nota che, come nel test precedente, l'andamento non è costante e quindi occorre introdurre le correzioni già descritte.

Ricordiamo che le curve continue indicano i valori dell'offset e quelle tratteggiate sono ottenute da queste aggiungendo e sottraendo il valore della loro deviazione standard. In questo caso abbiamo ottenuto che: sulla direzione Nord-Sud, la deviazione standard per la sonda MEMS è $\sigma_{N-S, MEMS} = 0.7 \text{ mm}$, mentre quella per l'inclinometro di riferimento è $\sigma_{N-S, Trad.} = 0.29 \text{ mm}$; sulla direzione Est-Ovest le deviazioni standard delle due sonde sono $\sigma_{E-O, MEMS} = 0.22 \text{ mm}$ e $\sigma_{E-O, Trad.} = 0.07 \text{ mm}$.

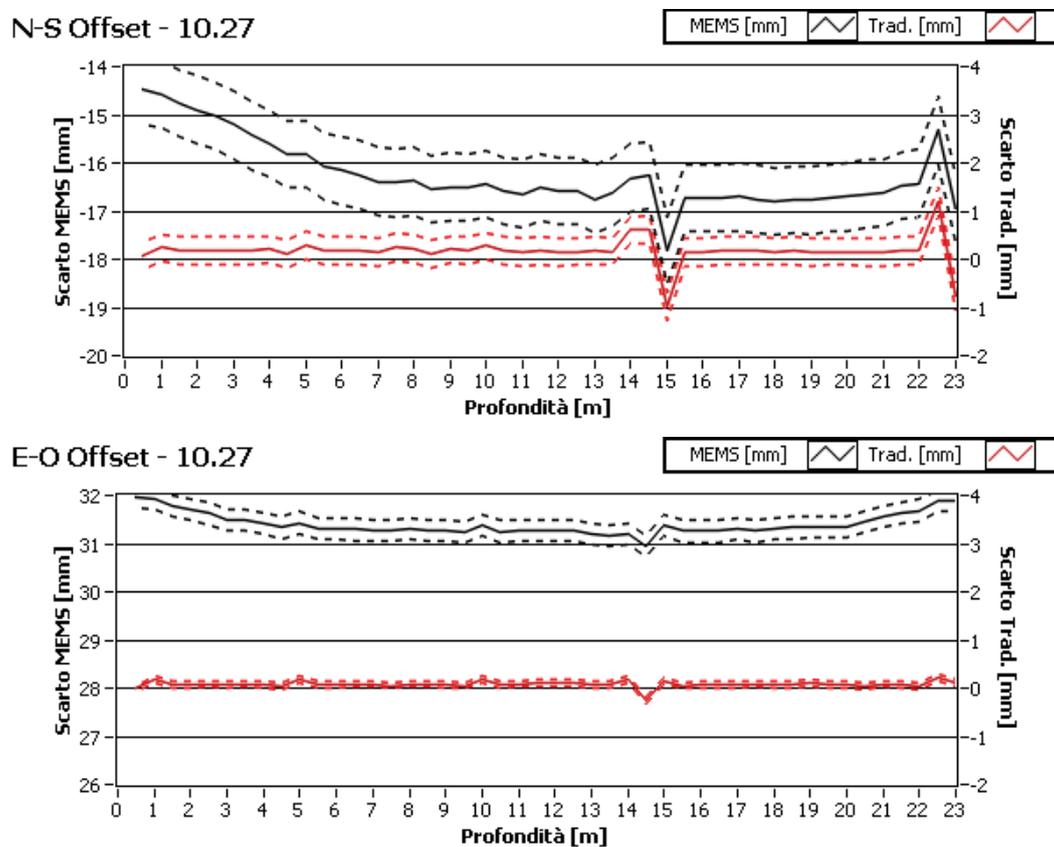


Figura 14: Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm), lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l'altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

Nella Figura 15 il grafico esprime la variazione di temperatura in funzione della profondità per entrambe le misure. Per ottenere le curve di correzione si è moltiplicato il coefficiente di deriva termica di ciascun asse per i dati rappresentati nel grafico in questione. In

seguito, i valori ottenuti dall'operazione sono stati sommati a quelli dell'accelerazione, prima di ricavare il segnale raziometrico.

Anche in questo caso, abbiamo preferito correggere il comportamento dell'offset variando leggermente il valore del coefficiente di deriva termica ottenuto sperimentalmente. Nel corso dei test eseguiti, infatti, è emerso che la determinazione sperimentale del coefficiente di correzione per la temperatura, che deve essere definito per ciascun asse di ogni sensore, non è sufficientemente precisa. Ciò è dovuto al fatto che tale misura va eseguita variando la temperatura e mantenendo fissa la posizione del sensore.

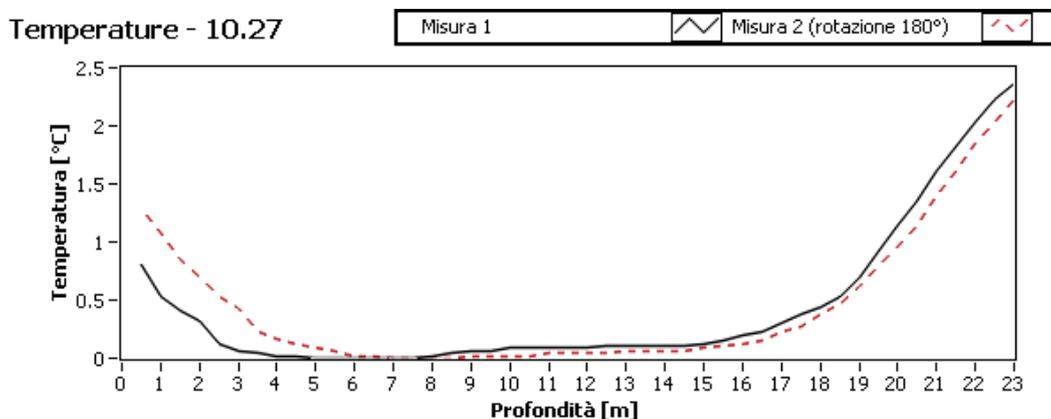


Figura 15: Variazione della temperatura durante le acquisizioni: nel caso della Misura 1, l'asse x dell'inclinometro (vedi Figura 1a) è diretto verso Nord; nel caso della Misura 2, invece, verso sud.

Dato che il cambiamento del livello di zero degli assi dei sensori è in genere inferiore a $1 \text{ mg}/^\circ\text{C}$ (dove $g \cong 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$), per determinare il coefficiente è necessario eseguire misure molto precise. Ciò non è possibile all'interno delle camere termostatiche a nostra disposizione, sia per la presenza di vibrazioni che per la mancanza di supporti stabili all'interno. D'altra parte, se si pone il sensore da studiare su un piano di riferimento, adatto a misure d'inclinazione, non è possibile sfruttare escursioni termiche efficaci.

Per questi motivi, abbiamo preferito determinare le correzioni sull'andamento dell'offset, pur partendo dal valore sperimentale dei coefficienti. Il risultato della correzione per l'offset è mostrato nei

grafici della Figura 16 e le nuove deviazioni standard sono $\sigma_{N-S, MEMS} = 0.36 \text{ mm}$ e $\sigma_{E-O, MEMS} = 0.16 \text{ mm}$.

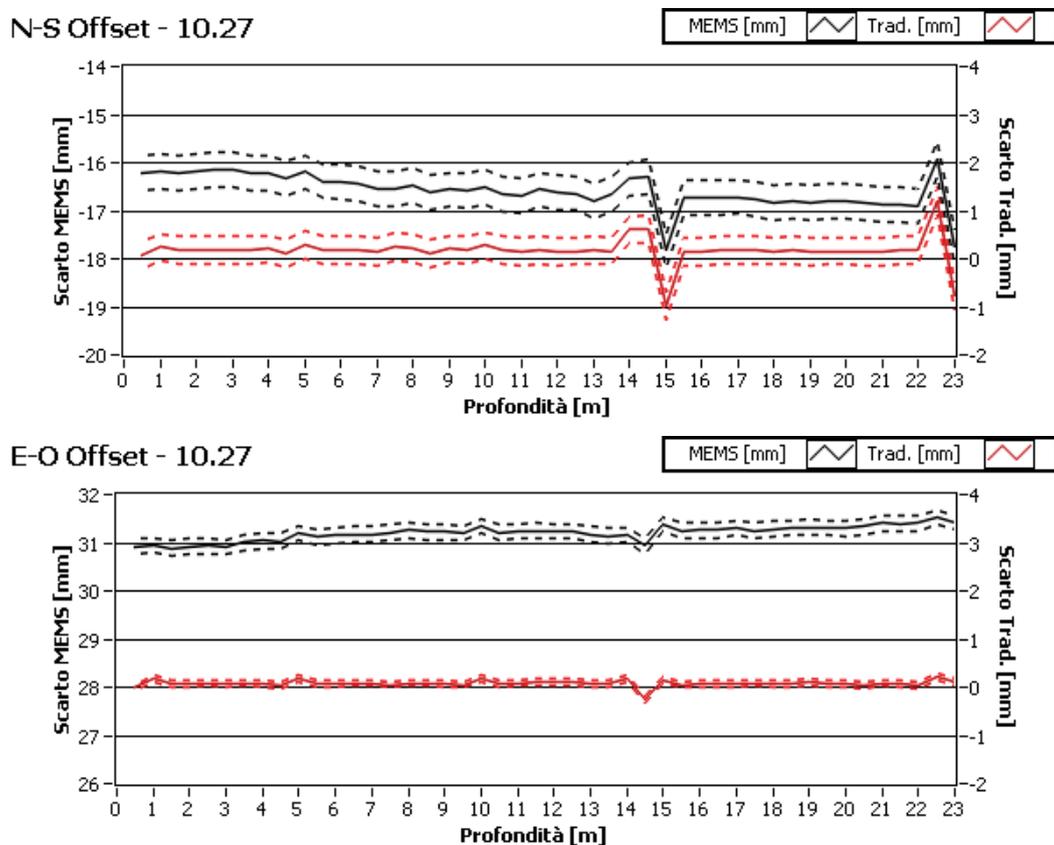


Figura 16: Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm) lungo le due direzioni di riferimento, dopo la correzione della deriva termica, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l’altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

Nonostante si siano ottenuti miglioramenti per entrambi gli assi del sensore, dopo la correzione della temperatura è ancora presente una tendenza nell’andamento dei grafici della Figura 16. Per eliminarla ci siamo serviti dei dati riguardanti la tensione d’alimentazione, che sono rappresentati nel grafico in Figura 17.

Come per il test precedente, abbiamo individuato un coefficiente per ciascun asse dell’accelerometro, che ci ha permesso di ricavare le curve di correzione.

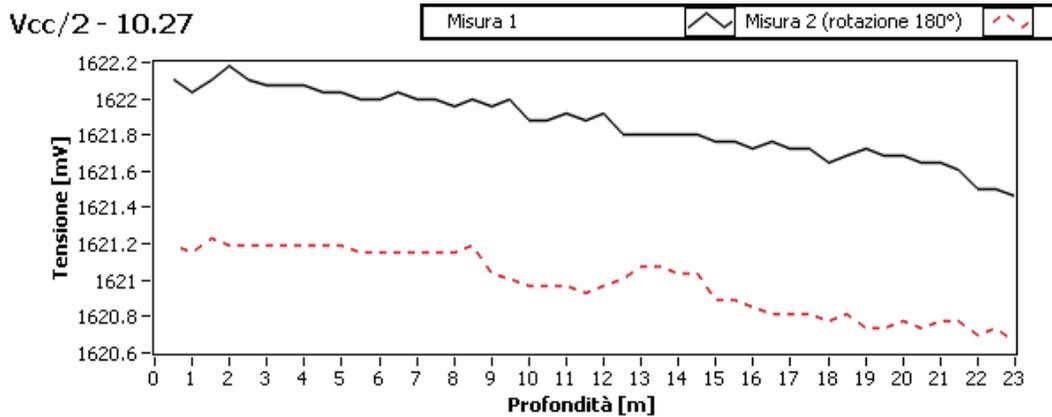


Figura 17: Valori della $V_{cc}/2$ durante le due misure.

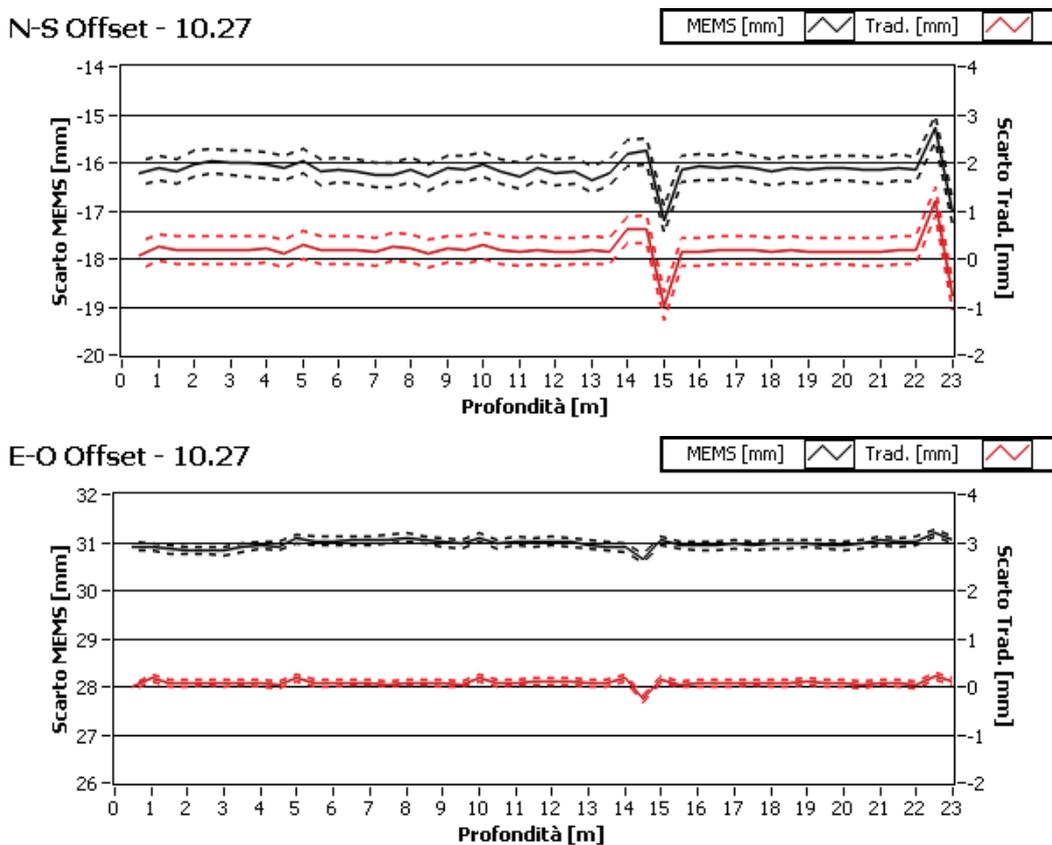


Figura 18: Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm) lungo le due direzioni di riferimento, dopo la correzione della deriva termica e della tensione d'alimentazione, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello "tradizionale" usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l'altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

Nei grafici della Figura 18 è rappresentato lo scarto sulle misure in funzione della profondità, dopo l'applicazione delle correzioni sopra descritte. Calcolando la deviazione standard sulle curve corrette si ricava che $\sigma_{N-S, MEMS} = 0.27 \text{ mm}$ e $\sigma_{E-O, MEMS} = 0.09 \text{ mm}$.

Il miglioramento rispetto ai valori iniziali è dunque considerevole e, come nel test precedente, si nota un buon accordo fra i dati ottenuti con le due sonde: i picchi si presentano negli stessi punti, con ampiezza confrontabile, come testimoniano i valori delle deviazioni standard per i due inclinometri.

Si noti che tale ampiezza è aumentata rispetto alla prima campagna di misura, a causa della maggiore deformazione del tubo inclinometrico, che, per l'asimmetria del carrello, abbiamo indicato come principale responsabile di questi scarti sulle misure.

L'aumento della deformazione del tubo fa sì che l'accordo, fra le curve dell'offset dei due sensori a confronto, sia maggiore rispetto al primo test comparativo. Ciò accade perché ci si allontana dal limite di sensibilità dell'accelerometro MEMS.

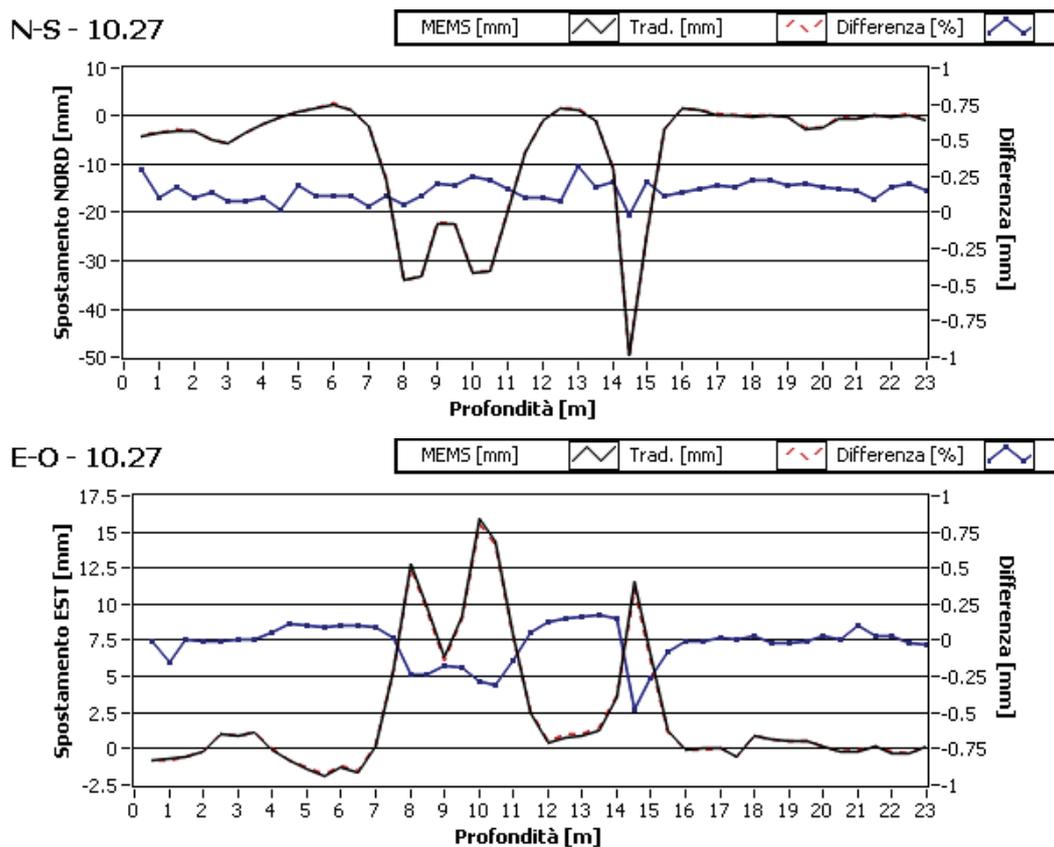


Figura 19: Grafici degli spostamenti differenziali (in mm) dopo le correzioni, lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa tratteggiata). Poiché i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (curva blu continua, con markers) che rappresenta la differenza fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sulla destra del grafico.

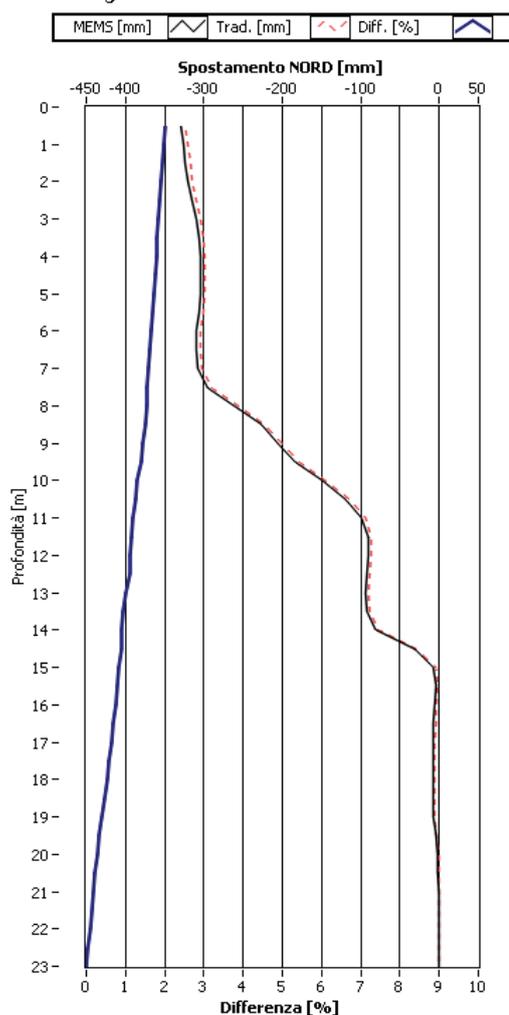
Nella Figura 19 riportiamo i grafici che esprimono lo spostamento differenziale in funzione della profondità per entrambi i sensori rispetto alle direzioni di riferimento. Tali grafici fanno riferimento ai dati corretti e, calcolando media e deviazione standard sulle curve che esprimono la differenza, si ottiene: $\bar{D}_{N-S} = 0.15$ mm, $\sigma_{D,N-S} = 0.07$ mm per la direzione Nord-sud e $\bar{D}_{E-O} = -0.02$ mm, $\sigma_{D,E-O} = 0.14$ mm per Est-Ovest. Da questi risultati si nota come le correzioni abbiano portato a migliorare la corrispondenza fra i dati raccolti dalle due sonde.

Analizziamo ora i grafici nella Figura 20, dove si confronta lo spostamento integrale, espresso in funzione della profondità, risultante dai dati delle due sonde su entrambe le direzioni d'interesse.

Per quanto riguarda la direzione Nord-Sud, notiamo che la differenza percentuale, indicata dalla curva in blu che fa riferimento alla scala sul fondo del grafico, è inversamente proporzionale alla profondità e raggiunge il valore massimo del 2%. Tale andamento è giustificato dal fatto che il valor medio della differenza fra le curve del primo grafico della Figura 19 è $\bar{D}_{N-S} = 0.15$ mm, per cui il nostro sensore tende a sovrastimare l'inclinazione rispetto alla sonda Sisgeo. Questo fatto si è verificato anche durante il primo confronto (Febbraio 2009), ma in quel caso, il valore della deviazione standard era maggiore della media, per cui in certi punti la misura dell'inclinazione, era sottostimata. Ora abbiamo che $\sigma_{D,N-S} = 0.07$ mm e la differenza fra le curve non è quasi mai negativa per cui, sulla misura integrale, si ottiene l'effetto che abbiamo descritto.

La situazione è diversa per quanto riguarda l'asse riferito alla direzione Est-Ovest, dove la differenza percentuale ha un andamento legato alle curve cui fa riferimento e si mantiene per la maggior parte delle misure inferiore a 1%. Queste percentuali si traducono in una differenza massima di circa 7 mm sullo spostamento Nord-sud e minore di 1 mm su Est-Ovest.

N-S - Integrale - 10.27



E-O - Integrale - 10.27

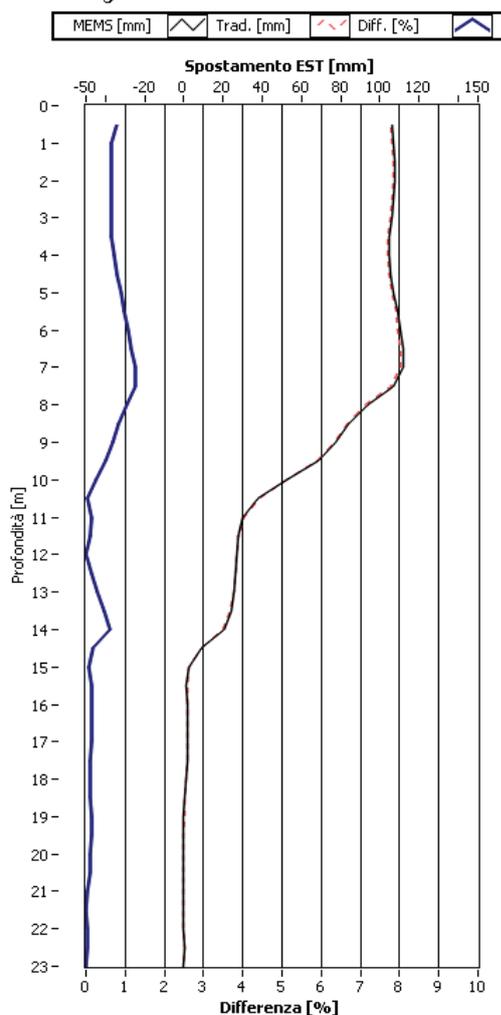


Figura 20: Grafici degli spostamenti integrali (in mm) dopo le correzioni, lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello “tradizionale” usato come riferimento (linea rossa tratteggiata). Poiché i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (blu, continua) che rappresenta la differenza percentuale fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sul fondo del grafico.

Terminiamo la descrizione dei test con la Figura 21, dove sono riportati tre grafici che mettono a confronto i risultati delle sonde:

- quello a sinistra rappresenta il **modulo dello spostamento**, in funzione della profondità, per entrambe le campagne di misura;
- quello in alto a destra rappresenta lo **spostamento integrale**, espresso in coordinate polari, per le due sonde, *nel primo test*;
- quello in basso a destra è analogo al grafico precedente, ma *per l'ultima campagna di misura*.

Modulo - Integrale - 02.27 e 10.27

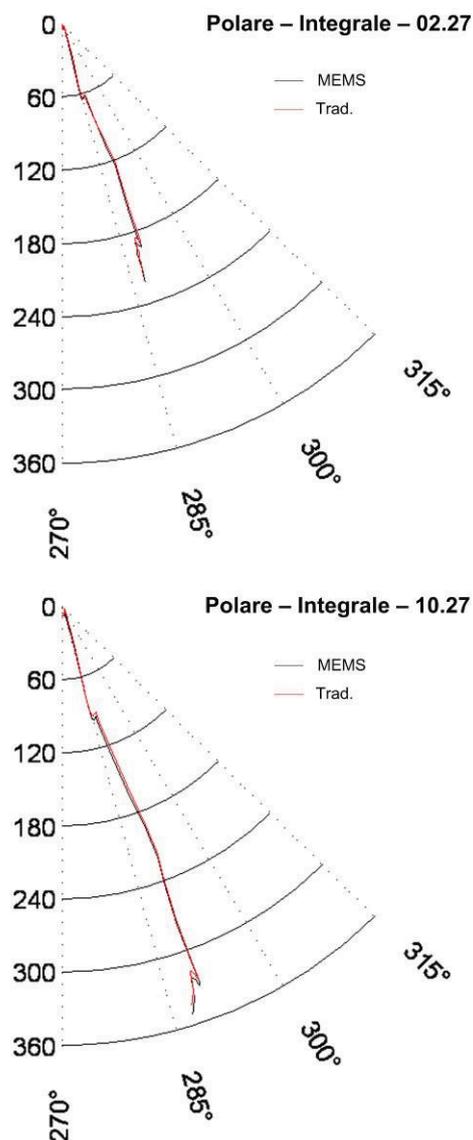
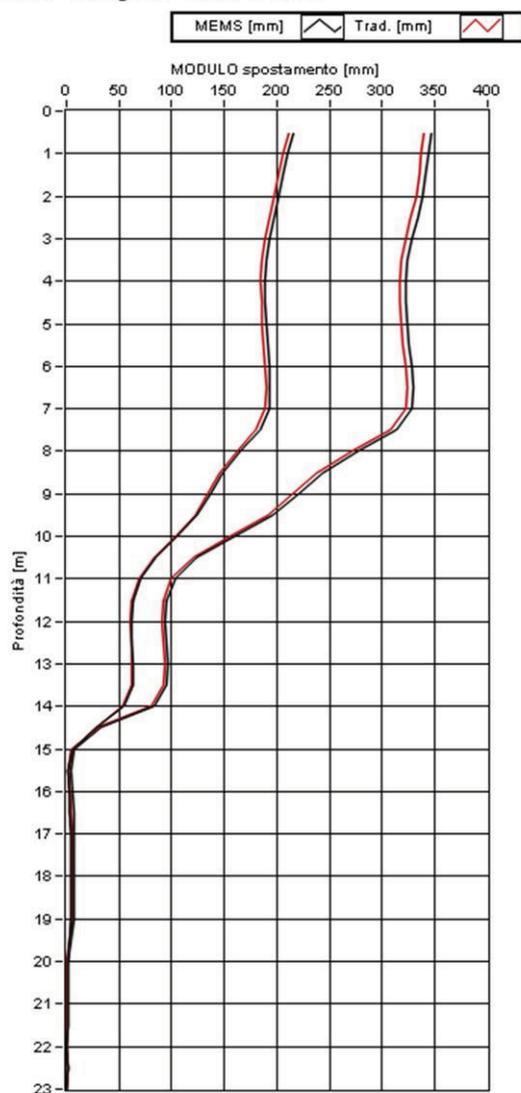


Figura 21: Il grafico a sinistra rappresenta il modulo dello spostamento integrale in funzione della profondità, per entrambe le campagne di misura. Le curve in nero si riferiscono all'inclinometro MEMS, quelle in rosso a quello di riferimento. I due grafici a destra rappresentano lo spostamento integrale in coordinate polari (270° corrisponde a Sud). Quello in alto riporta i risultati della prima campagna di misura e quello in basso i risultati dell'ultima. Anche in questi grafici sono messi a confronto, l'inclinometro MEMS (nero) e quello Sisgeo (rosso).

3.2. Il sistema "fisso"

Il sistema di monitoraggio che abbiamo descritto nel capitolo 1 è in funzione da circa tre anni, durante i quali sono state apportate modifiche finalizzate ad ottenere uno strumento affidabile.

A questo punto è opportuno fare una precisazione che riguarda gli obiettivi di questo periodo di sperimentazione. Abbiamo deciso di non

affiancare fin dall'inizio un tubo inclinometrico agli *aghi*, perché si è ritenuto opportuno testare preliminarmente il funzionamento generale della strumentazione. Questa decisione, che si è dimostrata utile, si è basata su considerazioni di tipo economico e tecnico:

- il costo per l'allestimento di una perforazione per sonde inclinometriche non è trascurabile e avrebbe inciso in maniera significativa sul magro bilancio della ricerca;
- le perforazioni attrezzate con tubo inclinometrico hanno una durata limitata nel tempo (che dipende dalla velocità dell'evoluzione del fronte franoso), poiché il movimento della frana tende a strozzare i tubi.

Queste due considerazioni giustificano l'intenzione di procedere al confronto con altri strumenti di monitoraggio, da utilizzare come riferimento, solo dopo aver verificato l'affidabilità del sistema e la coerenza dei dati da esso forniti. In caso di problemi, il sistema di confronto sarebbe stato superfluo, con il rischio di non averlo a disposizione al momento opportuno, perché eventualmente compromesso.

Occorre inoltre rilevare che ogni *ago* (diametro massimo, in corrispondenza dei giunti, pari a 70 mm) è stato inserito in un tubo in PVC, di diametro 80 mm, come si vede dalla Figura 22. In questo modo, finché il movimento della frana non ha deformato permanentemente i tubi, è stato possibile estrarre le sonde per apportare eventuali modifiche e/o per eseguire riparazioni. Questa possibilità si è rivelata molto utile nei casi di infiltrazione d'acqua, perché ci ha permesso di recuperare i sensori e ripararli. Per contro, lo svantaggio è rappresentato dal fatto che, per ottenere un corretto funzionamento del sistema di misura e valutarne le caratteristiche con precisione, è necessario immobilizzare l'*ago* nel terreno, in modo da ridurre al minimo i giochi e le possibilità di deriva meccanica. Nell'interpretazione dei dati, occorre tenere presente questa "mancanza" (imposta da esigenze di sperimentazione) e, nel caso di

un confronto con sistemi certificati, sarebbe necessario installare l'ago rendendolo definitivamente solidale con il terreno.

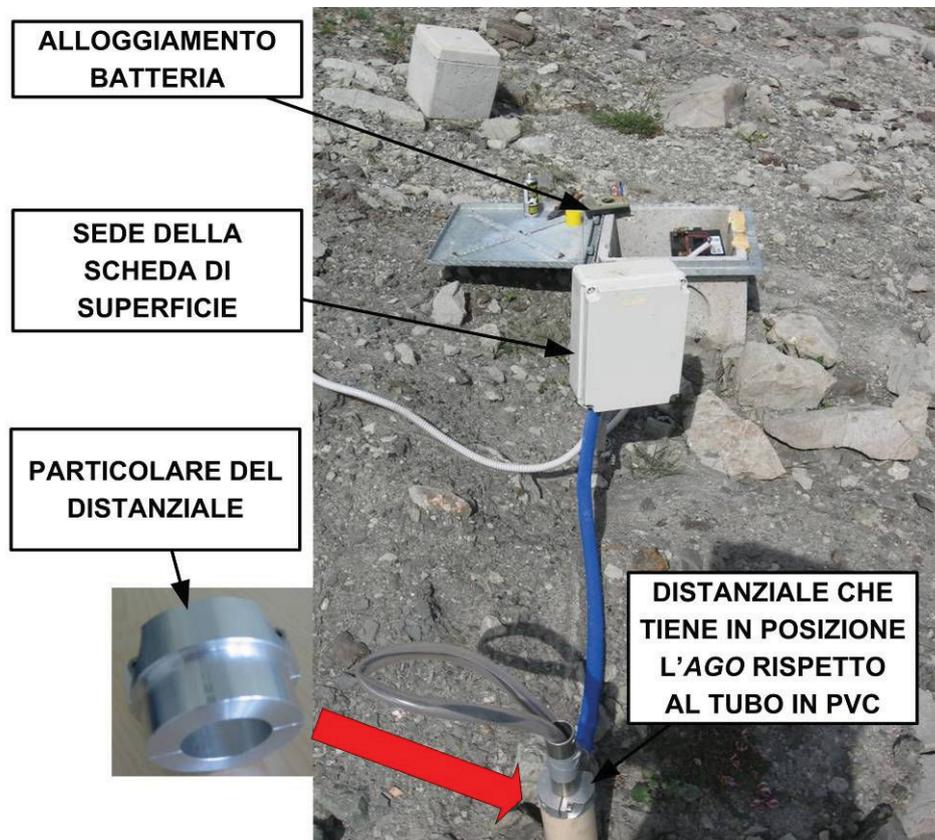


Figura 22: Fotografia che ritrae il primo punto di misura del sistema. Nell'immagine si possono vedere, l'alloggiamento della batteria e la scatola che contiene la *scheda di superficie*, la *scheda d'alimentazione* e il *modem* (cfr. cap. 1). In basso si vedono: il tubo in PVC, che sporge dal terreno, e l'ago che vi è inserito e che è mantenuto in posizione da un distanziale (particolare a sinistra).

Dopo queste premesse, che servono a capire il tipo di approccio con cui abbiamo affrontato la messa a punto del sistema in campo, analizziamo le problematiche incontrate, le soluzioni adottate e i quesiti cui dovremo dare risposta in futuro per terminare la messa a punto di questo strumento di monitoraggio.

L'affidabilità è uno dei fattori che ha creato più problemi nella fase iniziale: se da un lato non abbiamo avuto alcun guasto alle schede di superficie, dall'altro, gli inclinometri sono stati soggetti a numerosi problemi che ci hanno costretto a più di un intervento di manutenzione.

I primi inconvenienti si sono verificati al momento dell'assemblaggio, a causa delle piccole dimensioni del circuito integrato degli inclinometri e dell'elevato livello di miniaturizzazione dell'elettronica. Si tratta di componenti SMD (Surface Mounted Device), che necessitano di particolare attenzione al momento della saldatura su circuito integrato. Tale operazione avviene per mezzo di una maschera che permette di depositare sul circuito integrato piccole quantità di pasta fissante in corrispondenza dei pin dei componenti. Questi sono appoggiati sulla scheda elettronica in modo da combaciare con i punti di *saldatura* depositati e sono posti in un forno, dove il materiale per la saldatura liquefa e, dopo il raffreddamento, fissa l'elemento sulla scheda. I primi problemi si sono verificati a causa della novità dei procedimenti di saldatura per l'azienda che ha assemblato i circuiti integrati.

Abbiamo constatato che la quasi totalità dei guasti si è verificata per via di un cattivo fissaggio del microprocessore sul circuito integrato: esso, infatti, ha 28 pin di connessione suddivisi sui 4 lati (5 mm ciascuno), e quindi è il componente per cui è più delicata la fase di montaggio sul circuito integrato.

Nella prima versione realizzata, gli inclinometri non erano inseriti in un contenitore di PVC, come avviene ora, ma fissati su una reggetta di plastica e inseriti direttamente in un tubo di gomma flessibile. All'interno di ogni segmento dell'*ago*, in corrispondenza del sensore, si trovava un tassello in teflon, che, per mezzo di una vite, teneva premuto l'inclinometro contro la parete del tubo. Questa prima versione era afflitta da alcuni problemi che ci hanno portato a introdurre una serie di modifiche, fino alla versione attuale. In questa sede, non s'intende approfondire quest'argomento descrivendo le varie evoluzioni, ma soltanto accennare a quali sono stati i problemi di maggiore rilievo:

- infiltrazione d'acqua, che nella prima versione del sistema riusciva a penetrare dal fondo del tubo;

- stress meccanico degli elementi elettronici dell'inclinometro, dovuto al meccanismo di fissaggio utilizzato per renderli solidali con i segmenti dell'*ago*;
- deriva meccanica del sistema, dovuta a diversi fattori, legati sia al montaggio degli *aghi*, che all'influsso dell'ambiente circostante.

Quest'ultimo punto merita un approfondimento su quali siano stati, in effetti, gli elementi che hanno contribuito al verificarsi di questo fenomeno. L'analisi dei dati riguardanti il primo periodo di misura ha evidenziato la presenza di una deriva nelle misure, che aveva come conseguenza un movimento apparente della frana. La prova del fatto che si trattasse di una rappresentazione errata dell'evoluzione del fronte franoso era fornita dall'entità dello spostamento e dalla sua direzione, entrambi non compatibili con la morfologia del terreno monitorato. Abbiamo attribuito questo fenomeno allo sprofondamento dell'*ago* inserito nel tubo in PVC. Questo per via del suo peso (circa 30 Kg) e della consistenza del terreno sul fondo della perforazione, dove è sempre presente acqua. Per questa ragione abbiamo fissato il segmento in superficie tramite un opportuno distanziale, posto in corrispondenza dell'imboccatura del tubo arancione (Figura 22). In questo modo il problema legato alla deriva è stato in parte risolto.

Le altre cause del principale falso movimento della frana erano legate all'utilizzo del tubo di gomma, che conteneva i sensori e che era soggetto alle variazioni del livello dell'acqua nella perforazione, e al sistema di fissaggio degli inclinometri.

Questi problemi si sarebbero potuti in gran parte evitare, a patto di rinunciare al contenimento dei costi, che è uno degli obiettivi di questo progetto. L'approccio seguito ha richiesto notevole dispendio di tempo, perché ci ha costretto ad affrontare numerosi inconvenienti, ma ha consentito di ottenere finalmente un sistema affidabile, che ha anche conservato le caratteristiche iniziali di semplicità ed economicità.

Dopo alcuni cenni alle problematiche incontrate nella messa a punto della struttura meccanica del sistema, focalizziamo le modifiche che dovranno essere apportate per completarne la realizzazione. Dal punto di vista dell'elettronica, il progetto deve occuparsi del problema della tensione d'alimentazione. Al momento della prima progettazione elettronica si è deciso di limitare e stabilizzare la tensione di alimentazione dei sensori sulle schede di superficie, per poi inviarla agli inclinometri. Tale decisione è stata presa per i seguenti motivi:

- inserire uno stabilizzatore in ogni inclinometro ne avrebbe aumentato l'ingombro complessivo;
- si riteneva che la tensione generata sulla scheda di superficie non avrebbe subito variazioni tali da non essere corretta dal comportamento raziometrico dei sensori. Questo per via del basso consumo degli inclinometri e del fatto che la tensione è prelevata da una batteria, della quale, un pannello solare avrebbe dovuto mantenere costante il livello di carica (questa opportunità non si è potuta sfruttare per via del furto dei pannelli).

I dati raccolti hanno mostrato che il problema della stabilizzazione della tensione influisce sulle misure in maniera superiore alle attese. Inizialmente però il suo effetto è stato mascherato dalla deriva meccanica, che costituiva il contributo di maggiore rilievo all'errore.

Una prima miglioria da apportare al sistema consiste nello stabilizzare la tensione d'alimentazione per ogni inclinometro invece che sulla scheda di superficie. In particolare, si è scelto di utilizzare una doppia stabilizzazione: sulla scheda di superficie si stabilizza la tensione a 5 V e la si invia agli inclinometri dove, tramite un secondo regolatore, otteniamo i 3.3 V che servono per il corretto funzionamento del sensore.

3.2.1. Dati relativi al sistema nell'ultima versione

L'ultima versione del sistema, descritta nel capitolo 1, è stata aggiornata in due *aghi* su cinque, poiché il movimento della frana ha bloccato gli altri tre, impedendone l'estrazione.

I due *aghi* (nelle posizioni di misura 1 e 5 - Figura 1, Appendice A) sono stati aggiornati in momenti diversi e nei grafici che seguono riportiamo i valori degli spostamenti differenziali e integrali, riferiti ai periodi di funzionamento nell'ultima versione. Le interrogazioni del sistema sono avvenute con frequenza giornaliera fino al 14 novembre 2009, per poi proseguire con frequenza oraria. Nella Figura 23 si trovano i grafici che si riferiscono allo spostamento differenziale in funzione della profondità, per il punto di misura 1. Tali spostamenti fanno riferimento al periodo che va dal 24/09/2009 al 7/02/2010.

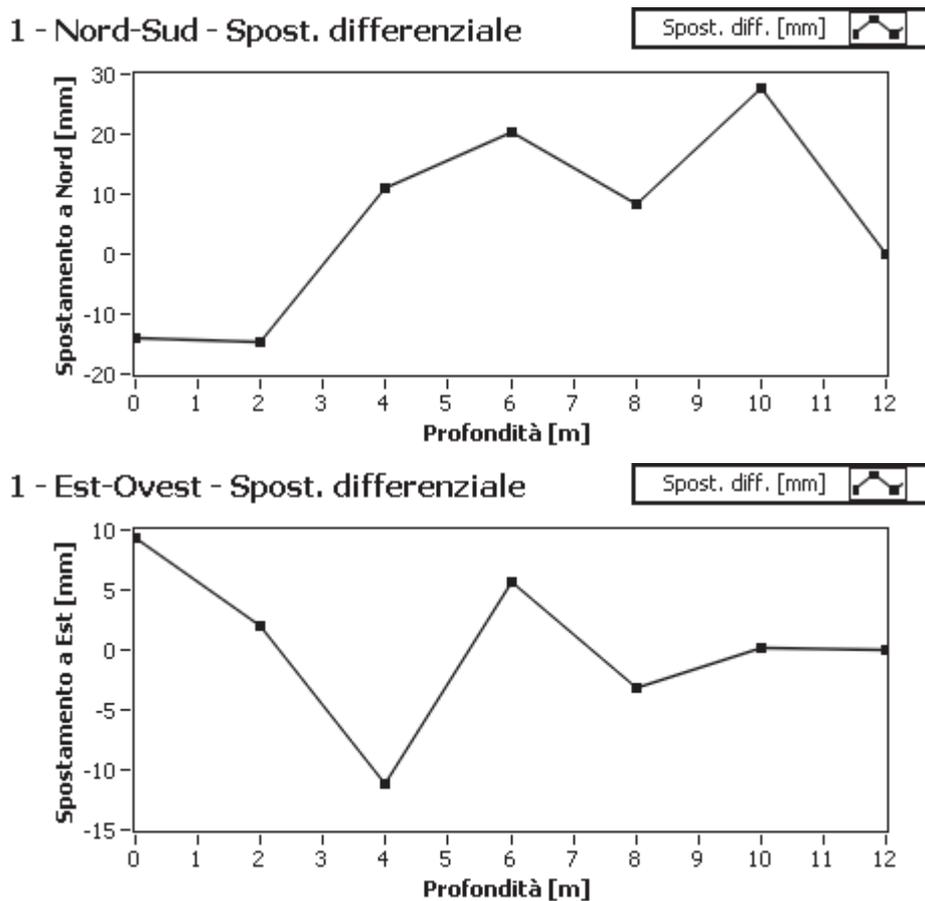


Figura 23: Grafici che rappresentano lo spostamento differenziale in funzione della profondità, per il punto di misura 1. Il primo riguarda la direzione Nord-Sud, mentre il secondo, la direzione Est-Ovest. Il periodo di riferimento va dal 24 settembre 2009 al 7 febbraio 2010.

Per integrazione dei valori riportati nei grafici della Figura 23, si ottengono quelli che compaiono nella Figura 24. Essi rappresentano lo spostamento integrale, lungo le due direzioni d'interesse, per il punto di misura 1.

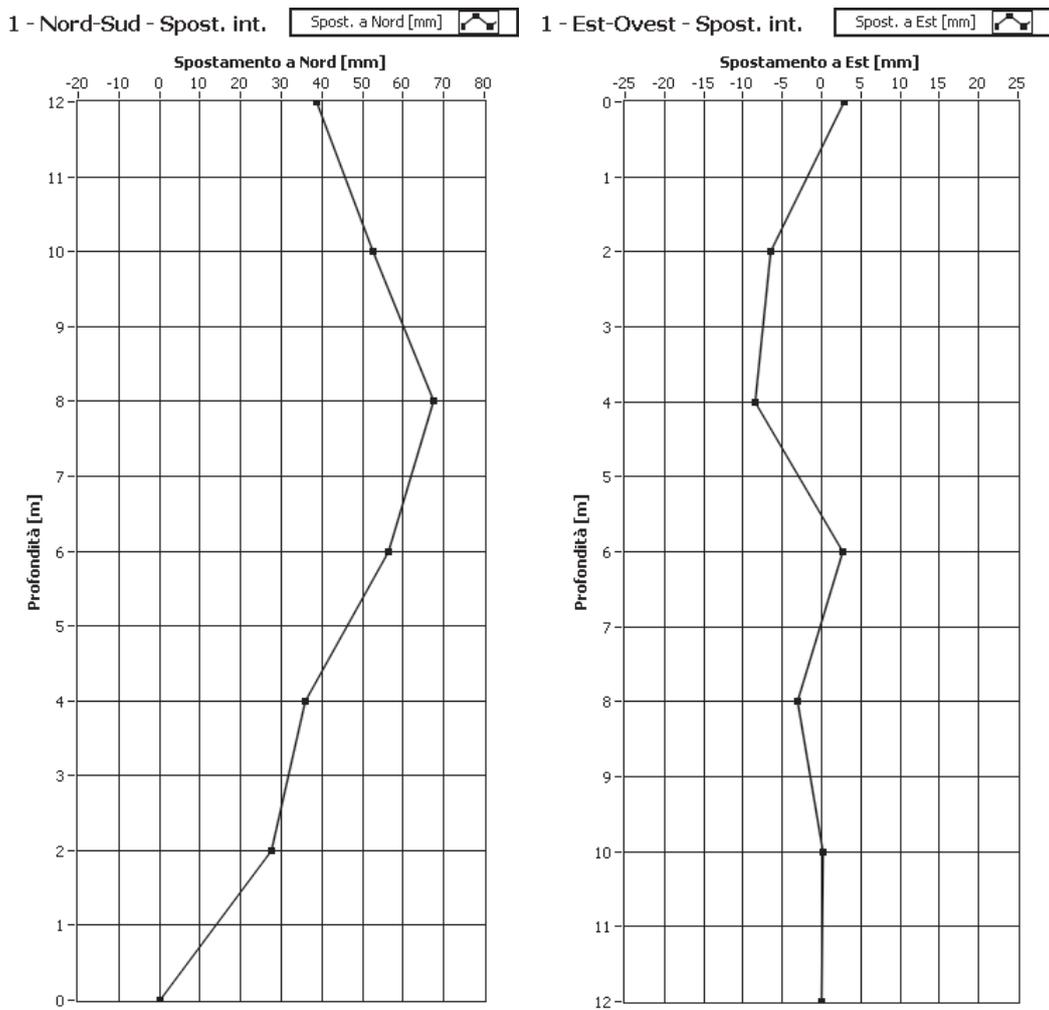


Figura 24: Grafici che dello spostamento integrale in funzione della profondità, per il punto di misure 1. Il primo riguarda la direzione Nord-Sud, mentre il secondo, la direzione Est-Ovest. Il periodo di riferimento va dal 24 settembre 2009 al 7 febbraio 2010.

Nelle seguenti figure si possono vedere i grafici dello spostamento differenziale e di quello integrale, riferiti alla posizione di misura 5, per il periodo che va dal 14 novembre 2009 al 7 febbraio 2010. Questo è stato il primo punto di misura a essere aggiornato all'ultima versione.

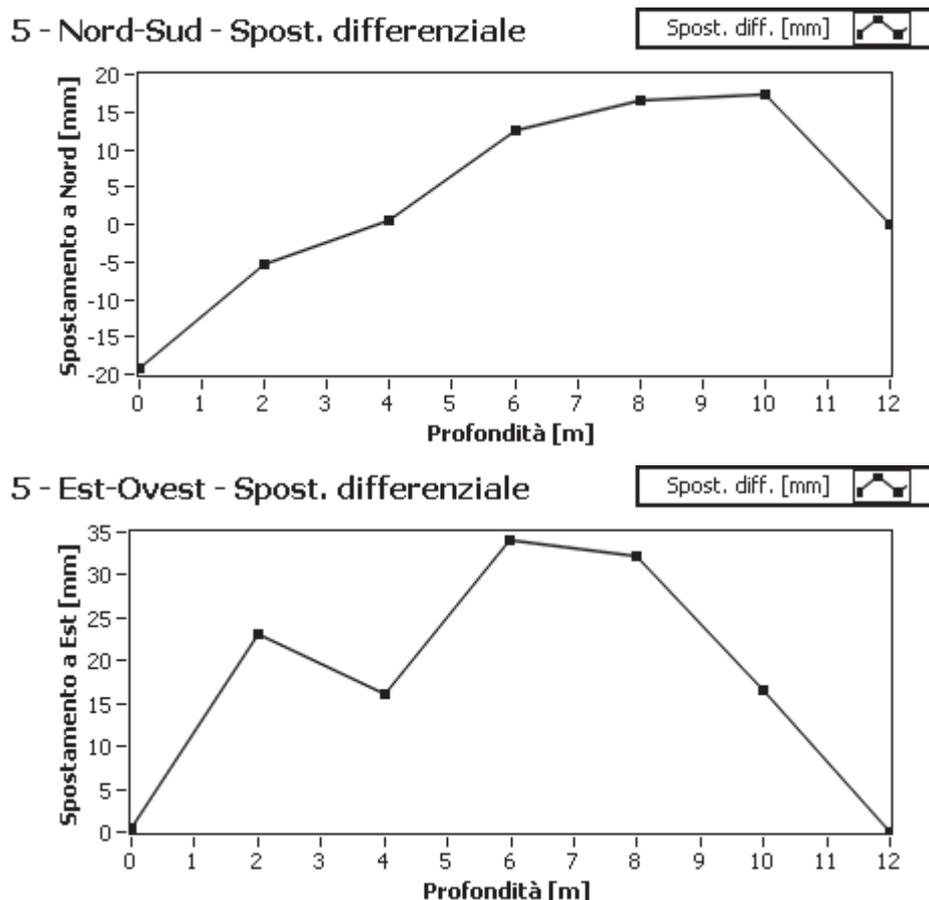


Figura 25: Grafici che rappresentano lo spostamento differenziale in funzione della profondità, per il punto di misura 5. Il primo riguarda la direzione Nord-Sud, mentre il secondo, la direzione Est-Ovest. Il periodo di riferimento va dal 14 novembre 2009 al 7 febbraio 2010.

Come già accennato, per eseguire misure precise con questo sistema e riuscire a determinarne con certezza le caratteristiche, occorrerebbe fissare gli *aghi* nel terreno in maniera adeguata. Inoltre, la lunghezza dei segmenti (2 metri) è troppo elevata per ottenere una buona risoluzione. Questa configurazione va bene per lo sviluppo iniziale, poiché può contare su più punti di misura. Questi consentono di valutare più *aghi*, funzionanti simultaneamente, permettendo in questo modo una migliore interpretazione dei dati. Tale discorso vale soprattutto dal punto di vista del funzionamento dell'elettronica, la cui ottimizzazione rappresenta l'obiettivo principale in questa fase della ricerca.

I dati che abbiamo presentato forniscono comunque delle importanti informazioni, in quanto i due punti di misura in questione non hanno subito grandi movimenti.

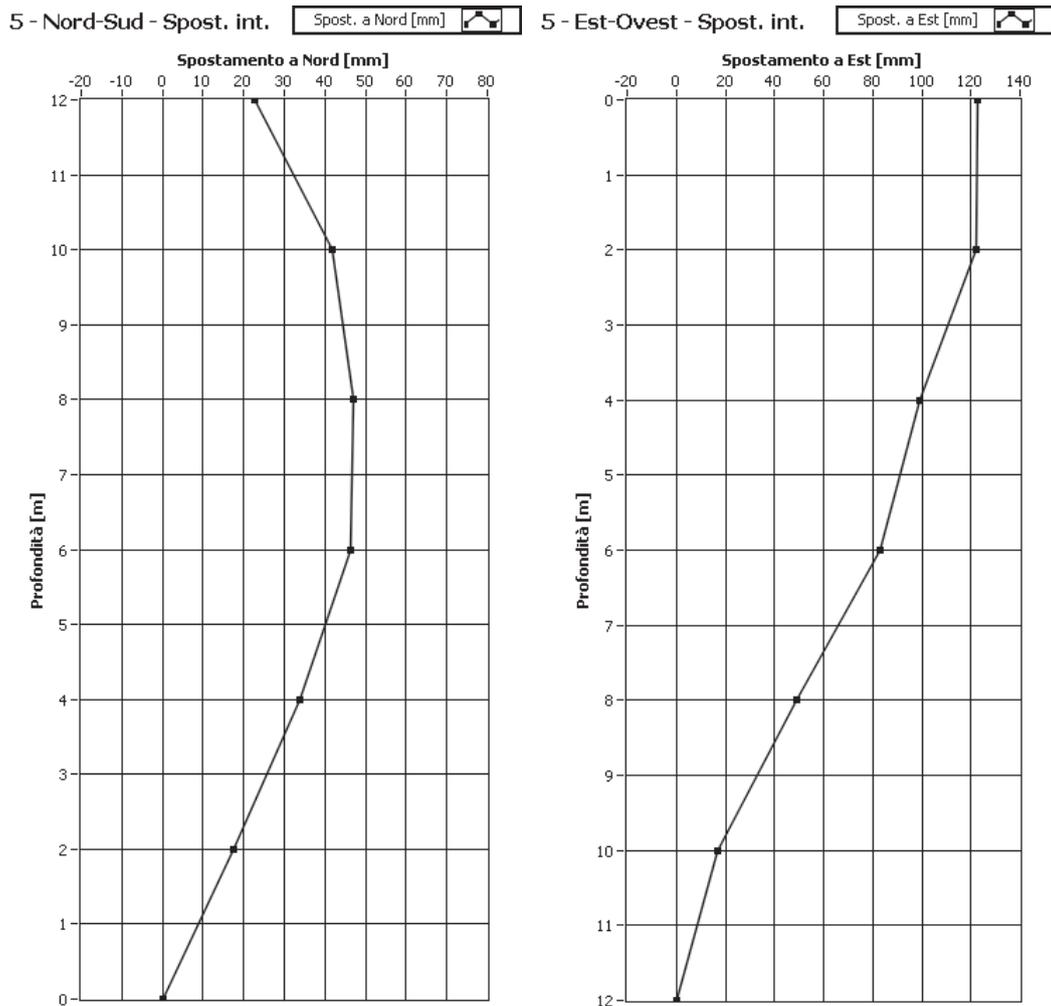


Figura 26: Grafici che dello spostamento integrale in funzione della profondità, per il punto di misure 5. Il primo riguarda la direzione Nord-Sud, mentre il secondo, la direzione Est-Ovest. Il periodo di riferimento va dal 14 novembre 2009 al 7 febbraio 2010.

Tale considerazione si basa sul fatto che dopo un lungo periodo, dal momento dell'installazione (inizio 2007) all'aggiornamento (fine 2009), siamo riusciti a estrarre gli *aghi* dal terreno: ciò non è stato possibile negli altri tre punti, dove il movimento ha bloccato gli *aghi*. I dati mostrano quindi che il sistema di misura non presenta più derive importanti, come aveva in precedenza. Gli spostamenti indicati sono molto piccoli rapportati al periodo di riferimento e soprattutto considerando le condizioni di misura. Il fatto che il tubo non sia ancorato sul fondo, ma solo in cima alla perforazione, introduce un'imprecisione che potrebbe essere compatibile con i movimenti rilevati. I grafici che abbiamo mostrato non hanno quindi come scopo principale la determinazione dello spostamento assoluto della frana sui

periodi a cui si riferiscono, ma servono soprattutto per comprovare la stabilità del sistema sul lungo periodo.

Occorre precisare che devono essere comunque apportate le migliorie alla parte elettronica, per via delle variazioni di tensione cui si è accennato.

Come esempio di questo problema facciamo riferimento ai grafici nella Figura 27. Il primo riporta i valori della tensione d'alimentazione dell'accelerometro cui fa riferimento. Come si può notare, nella tensione è presente uno sbalzo di cui non conosciamo l'origine. Il secondo grafico nella stessa figura, mostra che la discontinuità riscontrata nella tensione è presente anche nella curva riguardante lo spostamento, i cui valori sono ricavati dai dati raziometrici. Questo significa che la correzione raziometrica lineare non è sufficiente a correggere lo sbalzo. Osservando il terzo grafico, sempre nella stessa figura, si nota invece che la discontinuità, presente nel segnale in tensione (in mV, indicato in nero) non compare nello spostamento. In questo caso, la correzione raziometrica è stata sufficiente.

Nell'appendice A sono riportati tutti i grafici riguardanti gli spostamenti differenziali degli *aghi* 1 e 5, lungo le direzioni d'interesse. Inoltre, sono presentati i grafici dell'andamento della tensione d'alimentazione delle rispettive schede di superficie e della tensione stabilizzata inviata ai sensori.

Nei grafici dello spostamento in appendice è possibile riscontrare altri casi simili a quello descritto nella Figura 27.

I risultati ottenuti dal sistema dopo l'aggiornamento all'ultima versione, che ricordiamo essere quella descritta nel capitolo 1, in cui si utilizzano dei contenitori in PVC per i sensori, dimostrano che non sono più presenti derive meccaniche nei dati.

Nel prosieguo di questo progetto, sarà necessario concentrare l'attenzione sulla parte elettronica, per ottimizzarla, risolvere i problemi incontrati e valutare l'esistenza di altri. In seguito alle modifiche pianificate, in assenza di altri elementi di criticità, si procederà alla determinazione delle caratteristiche di misura del

sistema, tramite confronto con strumenti di riferimento (affiancamento di un tubo inclinometrico).

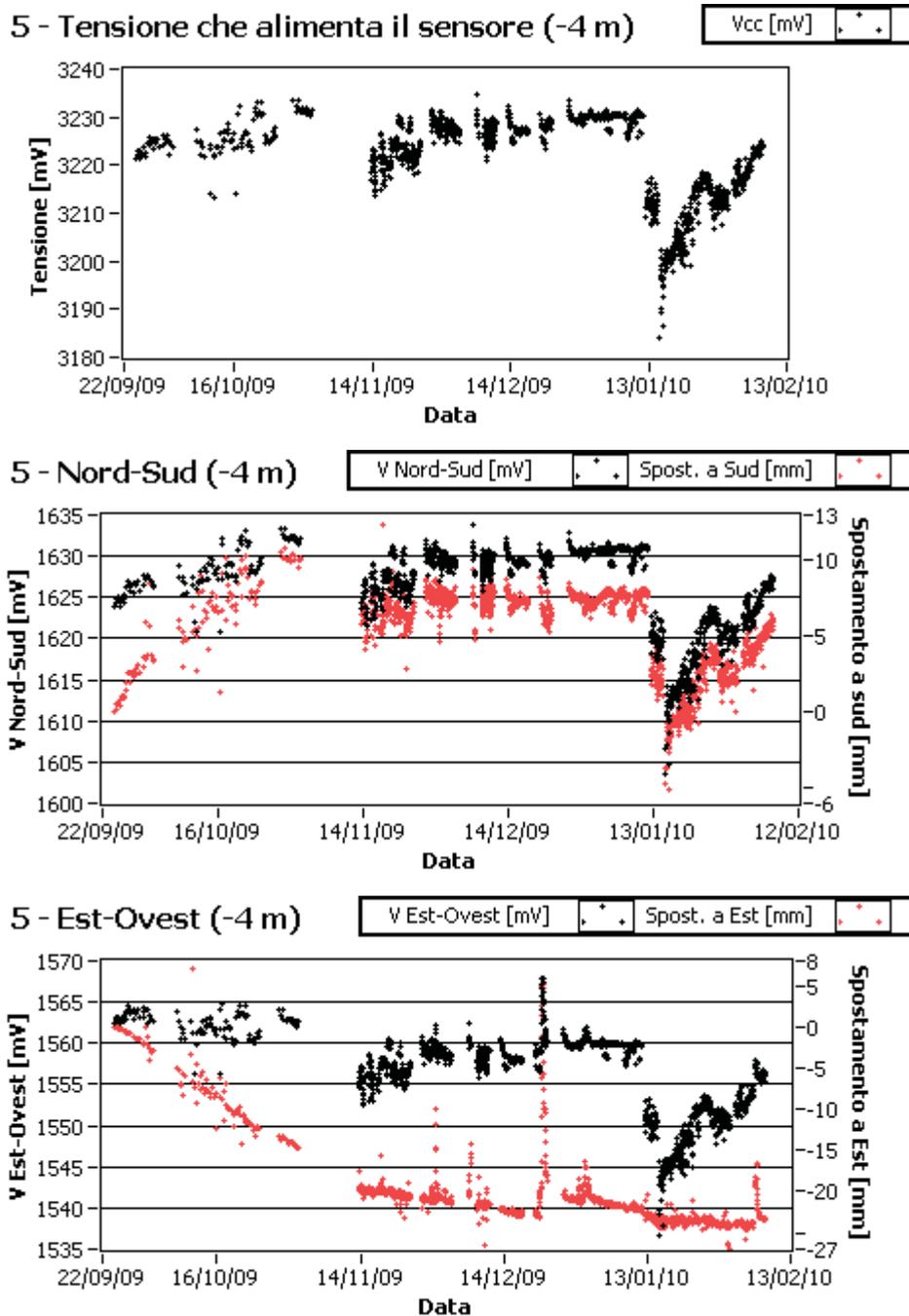


Figura 27: Il primo grafico (in alto) rappresenta la tensione d'alimentazione dell'accelerometro in esame, che si trova alla profondità di 4 m e appartiene all'*ago* situato nel punto di misura 5. Il secondo grafico indica l'uscita del sensore (in mV) sull'asse z (cui corrisponde la direzione Nord-Sud) e lo spostamento differenziale (in mm), riferito al primo valore acquisito dopo l'aggiornamento. Il terzo grafico è analogo al secondo, ma per l'asse y (cui corrisponde la direzione Est-Ovest). Gli spostamenti differenziali sono ottenuti dai dati dopo la correzione raziometrica. Si noti che la correzione non è efficace su entrambi gli assi.

3.2.2. Stabilizzazione della tensione d'alimentazione

Per verificare la validità di questa soluzione, e per escludere che gli sbalzi di tensione siano dovuti a un malfunzionamento degli accelerometri, abbiamo allestito un test di stabilità del sistema. Tramite un trasformatore a 18 V c.c. abbiamo alimentato 2 diverse configurazioni di sensori: una costituita da 4 inclinometri, ancora nella vecchia configurazione; una in cui abbiamo sfruttato la doppia stabilizzazione, applicata a un singolo inclinometro.

Tutti i sensori sono stati fissati in una posizione stabile, al fine di poter valutare l'effetto di altri fenomeni sull'uscita degli accelerometri. Gli inclinometri sono alimentati ininterrottamente e l'output di ognuno è acquisito con cadenza di 5 minuti, per un totale di 288 acquisizioni al giorno. Durante l'intera prova abbiamo compiuto poco meno di 8000 acquisizioni, corrispondenti a circa 28 giorni di misure ininterrotte.

Di seguito riportiamo i risultati ottenuti, partendo dal grafico in Figura 28. Esso indica l'andamento della tensione in uscita dal trasformatore che alimenta gli inclinometri: si può notare che l'andamento è oscillante e tende a crescere lievemente col tempo (ricordiamo che la cadenza di acquisizione corrisponde a 5 minuti).

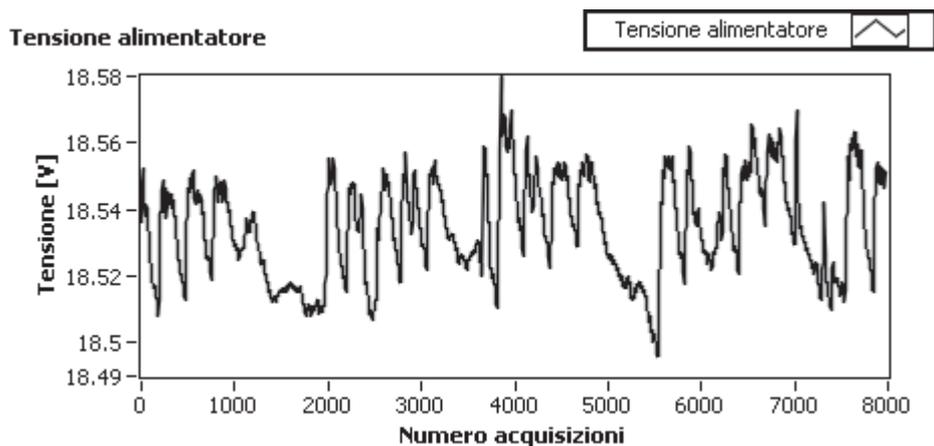


Figura 28: Grafico che riporta l'andamento della tensione erogata dal trasformatore che alimenta i sensori.

L'origine delle oscillazioni, che sono dell'ordine di qualche decina di millivolt, è legata all'effetto della temperatura, le cui variazioni

influenzano direttamente la tensione prodotta dal trasformatore. Infatti, se osserviamo il grafico in Figura 29, che rappresenta la variazione della temperatura durante le misure, notiamo una forte correlazione con i dati del grafico nella Figura 28.

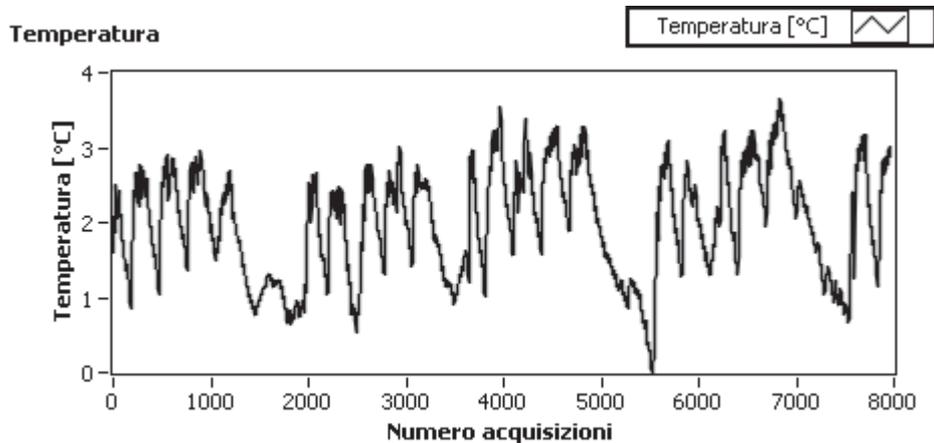


Figura 29: Grafico che rappresenta la variazione della temperatura durante le misure. Il dato è fornito dal sensore di temperatura integrato nel microprocessore di un inclinometro.

Quelle espresse finora sono considerazioni generali, che riguardano entrambe le configurazioni dei sensori.

Analizziamo i dati ottenuti dagli inclinometri nella versione già installata sul sistema di misura che abbiamo realizzato.

Il grafico nella Figura 30 riporta i valori della tensione dopo la stabilizzazione che avviene sulla scheda di superficie.

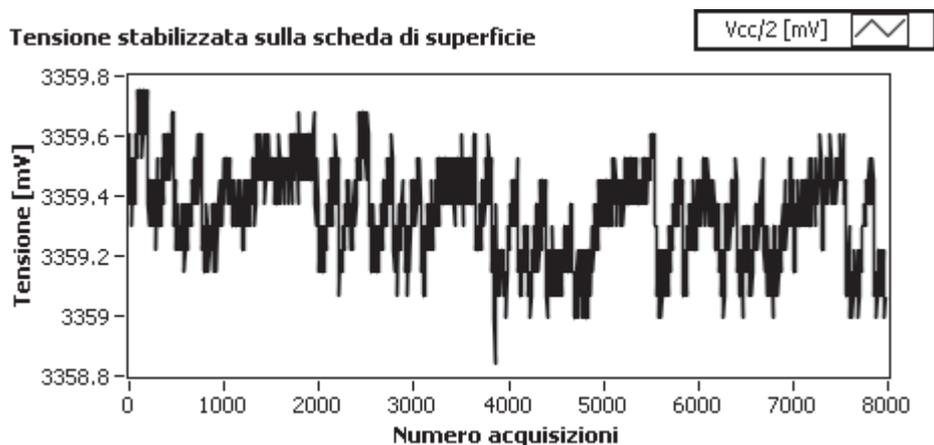


Figura 30: Grafico che rappresenta l'andamento della tensione d'alimentazione ($V_{cc}/2$) durante le misure.

Come si può notare, l'influenza della temperatura è ancora presente, anche se in misura molto minore rispetto a prima. L'ampiezza delle oscillazioni infatti non supera 0.3 mV e, come si vede dalla forma (squadrata e discreta) della curva rappresentata, le variazioni più piccole sono prossime alla risoluzione dell'acquisitore (dell'ordine di 30 μ V).

Il grafico in Figura 31 indica l'andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro in funzione della serie temporale acquisita. I dati rappresentati in tale grafico, costituiscono un esempio esplicativo dei problemi che si riscontrano nelle misure del prototipo di sistema *fisso* installato sulla frana (cfr. primo grafico Figura 27).

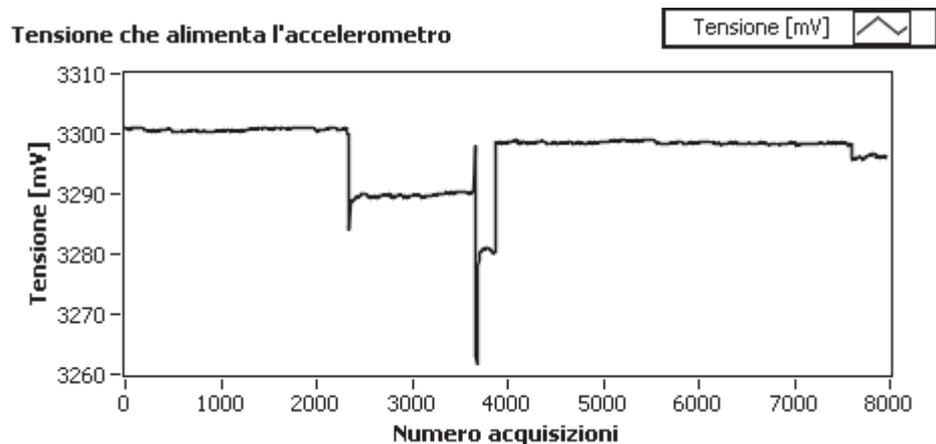


Figura 31: Grafico della tensione ($V_{cc}/2$), proveniente dallo stabilizzatore della scheda di superficie, che alimenta l'accelerometro.

Nonostante l'azione dello stabilizzatore, la tensione che effettivamente alimenta l'accelerometro MEMS ha un andamento discontinuo, con escursioni superiori a 15 mV. Inoltre, se osserviamo il dettaglio dei primi 2000 punti acquisiti, come mostrato nella Figura 32, notiamo che l'effetto della temperatura è presente nella tensione che alimenta il sensore, ed è superiore rispetto a quanto riscontrato all'uscita dello stabilizzatore. Le oscillazioni della tensione dovute alla temperatura sono comunque di entità ridotta e sono ampiamente trascurabili rispetto agli sbalzi visibili nel grafico in Figura 31.

Nella Figura 33 sono raffigurati i grafici riguardanti i tre assi di uno dei 4 accelerometri che sono alimentati dalla tensione stabilizzata

sulla scheda di superficie (vedi Figura 30). La curva in rosso rappresenta il segnale in uscita dal sensore, prima della correzione raziometrica. La curva in nero indica invece l'accelerazione, espressa in unità di g, quindi dopo la correzione raziometrica.

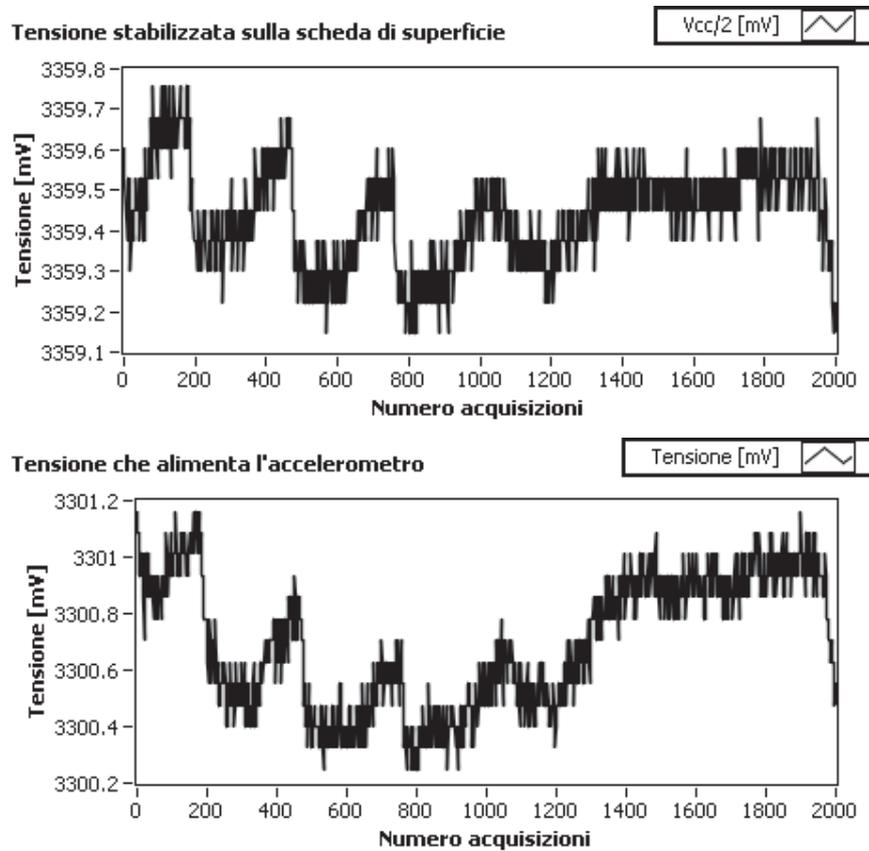


Figura 32: Grafici che mostrano i valori dei primi 2000 punti acquisiti. Il grafico in alto si riferisce alla tensione che alimenta l'accelerometro, mentre quello in basso alla tensione stabilizzata sulla scheda di superficie.

Come si può vedere dalle curve nei grafici, la sensibilità dei sensori alle variazioni della temperatura si manifesta nei dati in maniera evidente e in misura diversa fra gli assi.

In questo caso non applichiamo la correzione di temperatura, perché vogliamo concentrarci su ciò che avviene in prossimità degli sbalzi della tensione che alimenta il sensore. Innanzi tutto si può osservare che, per tutti e tre gli assi, la correzione raziometrica non è sufficiente a compensare la variazione di tensione. Come si è spiegato nel secondo paragrafo del capitolo 2, relativo all'errore raziometrico dei sensori, quanto più ci si allontana dalla tensione d'alimentazione

ideale (3.3 V), tanto più la correzione raziometrica del primo ordine è insufficiente e l'errore aumenta. Poiché nelle misure d'inclinazione utilizziamo i due assi normali alla direzione dell'accelerazione gravitazionale, tralasciamo dalla discussione l'asse del sensore che è diretto come il vettore \vec{g} .

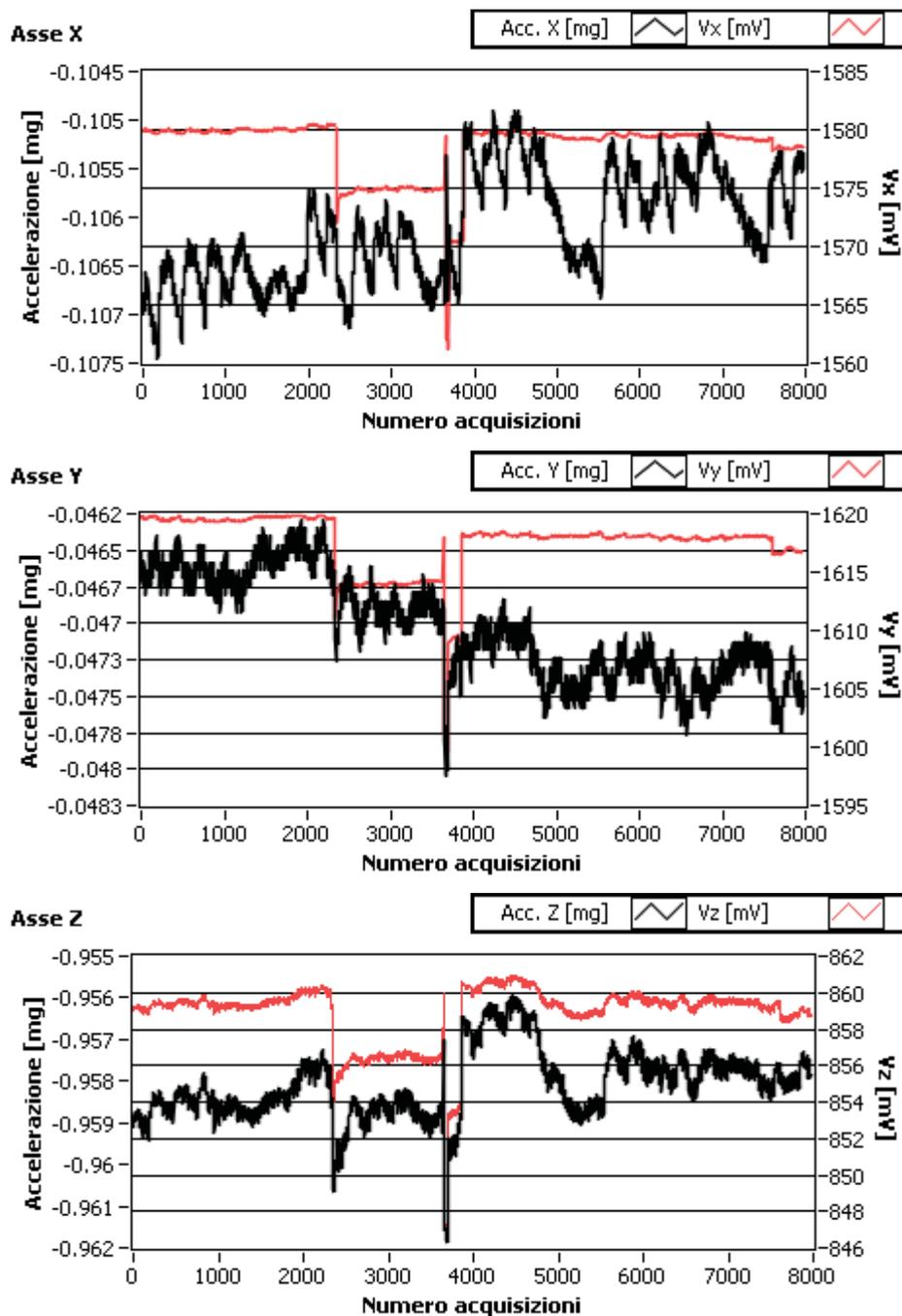


Figura 33: Grafici riferiti ai tre assi x , y , z di un accelerometro. Essi rappresentano: l'output del sensore prima della correzione raziometrica (curva in rosso); il valore (in mg) dell'accelerazione rilevata (curva in nero).

Abbiamo notato che per questo asse la variazione della tensione d'alimentazione V_{cc} produce effetti non trascurabili sia sul livello di zero sia sulla sensibilità. Per gli altri due assi, che hanno valori dell'uscita prossimi a zero, l'effetto della variazione di tensione sulla sensibilità può essere trascurato.

Non si può invece tralasciare quanto avviene per il livello di zero, che varia proporzionalmente con V_{cc} e quindi causa un errore. La determinazione delle caratteristiche raziometriche di questo tipo di sensori MEMS (paragrafo 2.2), è stata eseguita per capire l'effetto degli sbalzi sulla misura. L'errore che ne deriva, come abbiamo constatato, è rilevante e non può essere trascurato. Quando V_{cc} varia, i valori d'inclinazione che si ottengono sono maggiori o minori in funzione del fatto che la tensione sia diminuita o aumentata. Per eliminare questo errore, si dovrebbe definire come varia il livello di zero al variare di V_{cc} , per ogni asse di ciascun accelerometro (come abbiamo fatto nel capitolo 2, per un sensore). Questa taratura però richiederebbe un notevole dispendio di tempo e quindi non è una strada conveniente. Inoltre, nel nostro caso, gli sbalzi nella tensione d'alimentazione avvengono dopo la stabilizzazione, per cui sono da attribuire a un malfunzionamento dell'accelerometro (che causa una caduta di tensione), oppure a disturbi sul cavo flat che collega i sensori. Chiaramente la prima ipotesi è la più negativa, perché sarebbe impossibile intervenire. Nel caso in cui gli sbalzi siano dovuti a disturbi, invece, il rimedio consisterebbe nel migliorare la stabilizzazione della tensione d'alimentazione, inserendo un regolatore in ogni inclinometro. In questo modo si eviterebbe di avere un collegamento troppo lungo fra regolatore di tensione e accelerometro.

Durante questo test sulla stabilità delle misure, oltre ai 4 inclinometri testati (i risultati sono stati presentati solo per uno di essi perché rappresentativo del comportamento generale), abbiamo studiato una configurazione costituita da due stadi di stabilizzazione: la tensione

proveniente dal trasformatore è stata prima stabilizzata a 5 V e successivamente, in prossimità dell'accelerometro, a 3.3 V.

L'andamento della tensione, dopo questi due passaggi, è rappresentato nei grafici della Figura 34. Poiché in questa versione dell'inclinometro non è presente un misuratore di temperatura, per le variazioni di quest'ultima si fa riferimento al grafico nella Figura 29: ciò è giustificato dal fatto che l'inclinometro nella prima versione, che ha il misuratore di temperatura, e quello con la doppia stabilizzazione, sono vicini fra loro (distanza minore di 5 cm) e le misure sono simultanee.

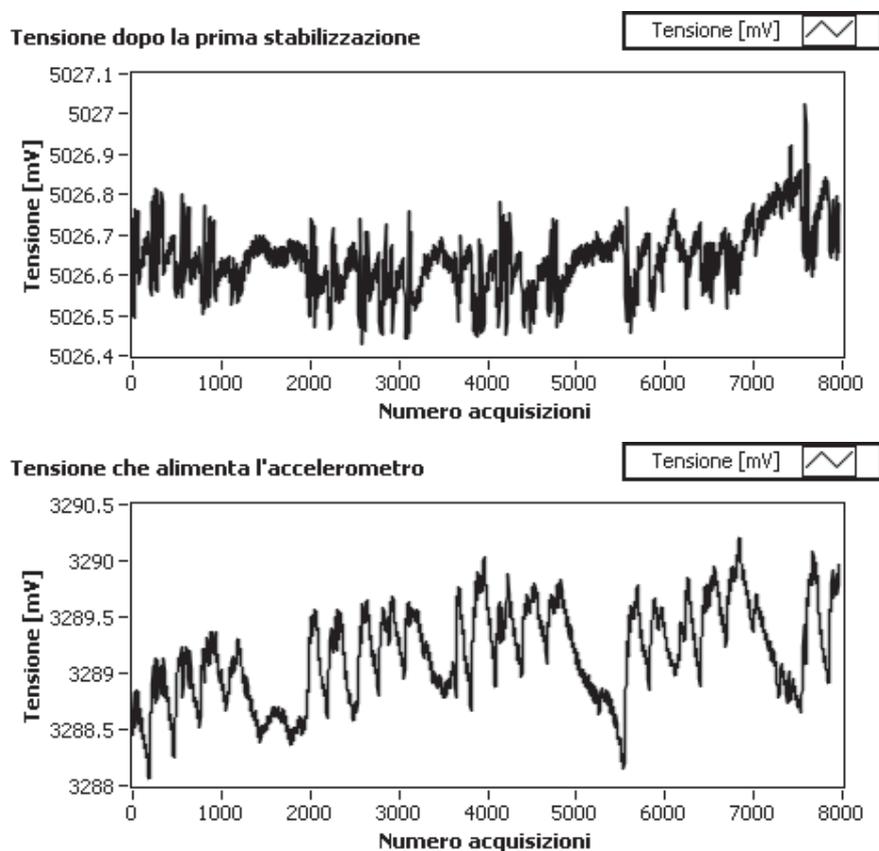


Figura 34: Il grafico in alto indica l'andamento della tensione (in arrivo dal trasformatore) dopo che è stata stabilizzata a 5 V.

Osserviamo l'effetto della temperatura sui limitatori di tensione: rispetto allo stabilizzatore impiegato sulle schede di superficie, questi risentono maggiormente delle variazioni di temperatura. È bene ricordare che con questa prova abbiamo voluto verificare l'origine degli sbalzi e non trovare la soluzione definitiva per l'alimentazione dei sensori. Un'indagine basata su misure di lungo periodo in

condizioni controllate, permette di escludere eventuali malfunzionamenti dei MEMS, che potrebbero portare ad assorbimenti anomali di tensione. Per ridurre le oscillazioni dovute alla temperatura, oppure la presenza di derive nella V_{cc} , invece, è possibile utilizzare componentistica elettronica con caratteristiche più adatte allo scopo.

Dall'andamento della tensione d'alimentazione si può dedurre che gli sbalzi presenti negli altri sensori, in questo caso non avvengono, per cui essi non sono attribuibili all'accelerometro, ma all'intervento di rumore ambientale.

I grafici nella Figura 35 mostrano come variano le uscite dei tre assi dell'accelerometro per una lunga serie temporale di misure. Come si può notare, è la temperatura a influire principalmente sui dati, e nei segnali non sono presenti discontinuità dovute a sbalzi nella tensione d'alimentazione. Questo costituisce un ottimo risultato, perché è la prova del fatto che, stabilizzando V_{cc} in prossimità del sensore, si elimina il problema degli sbalzi di tensione.

Osservando il primo grafico nella Figura 35 e confrontandolo con l'andamento di V_{cc} (Figura 34 in basso) si nota che le oscillazioni presenti nelle curve (dovute alla temperatura) sono in controfase. Ciò accade perché il coefficiente di deriva termica dell'asse x di questo accelerometro ha segno negativo. Come conseguenza, quando si applica la correzione raziometrica (cioè quando si divide il segnale in uscita per la tensione d'alimentazione), si amplifica l'effetto della temperatura sul segnale.

In realtà, poiché sia la tensione sia la temperatura influiscono sui valori in uscita dal sensore, è difficile definirne l'effetto complessivo sui valori dell'accelerazione. Ne consegue che la determinazione di una curva di correzione è complicata.

Come già detto, questo problema può essere ridimensionato utilizzando uno stabilizzatore con specifiche tecniche migliori, eliminando così la necessità di applicare correzioni a posteriori sui dati.

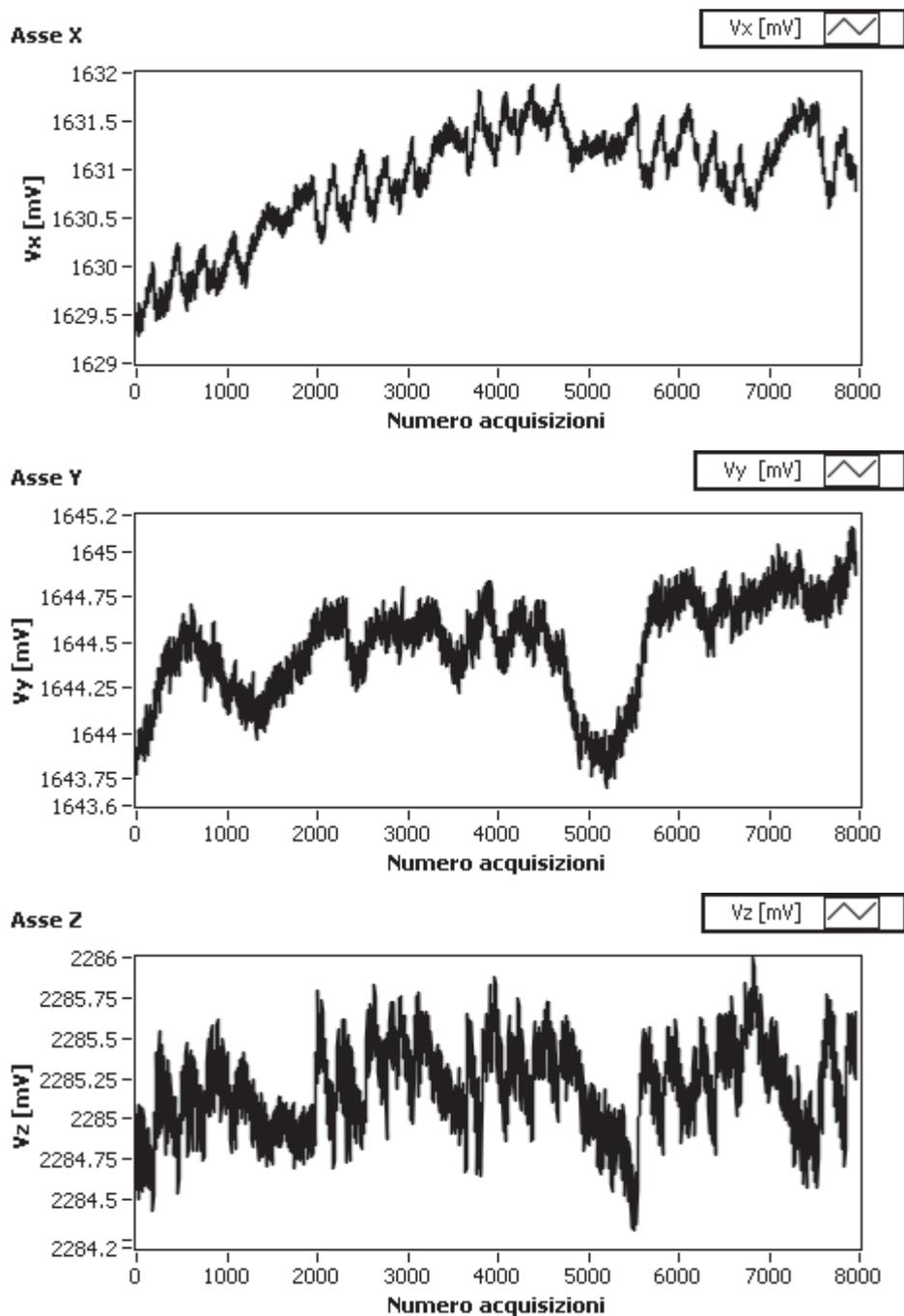


Figura 35: Grafici dell'uscita in tensione (mV), in funzione del numero di acquisizioni, per i tre assi dell'accelerometro nella configurazione con doppia stabilizzazione.

Nella Figura 36 ci sono i tre grafici riguardanti gli assi dell'accelerometro dopo l'applicazione della correzione raziometrica e la conversione in unità di g .

L'effetto termico non è stato corretto perché in questo caso esso è presente anche nella tensione d'alimentazione. Come conseguenza,

dopo l'applicazione della correzione raziometrica, sull'asse x l'influenza della temperatura è aumentata, mentre sull'asse z è quasi scomparsa.

Si nota inoltre una leggera deriva nei dati che si manifesta soprattutto sull'asse x , nella prima parte del test.

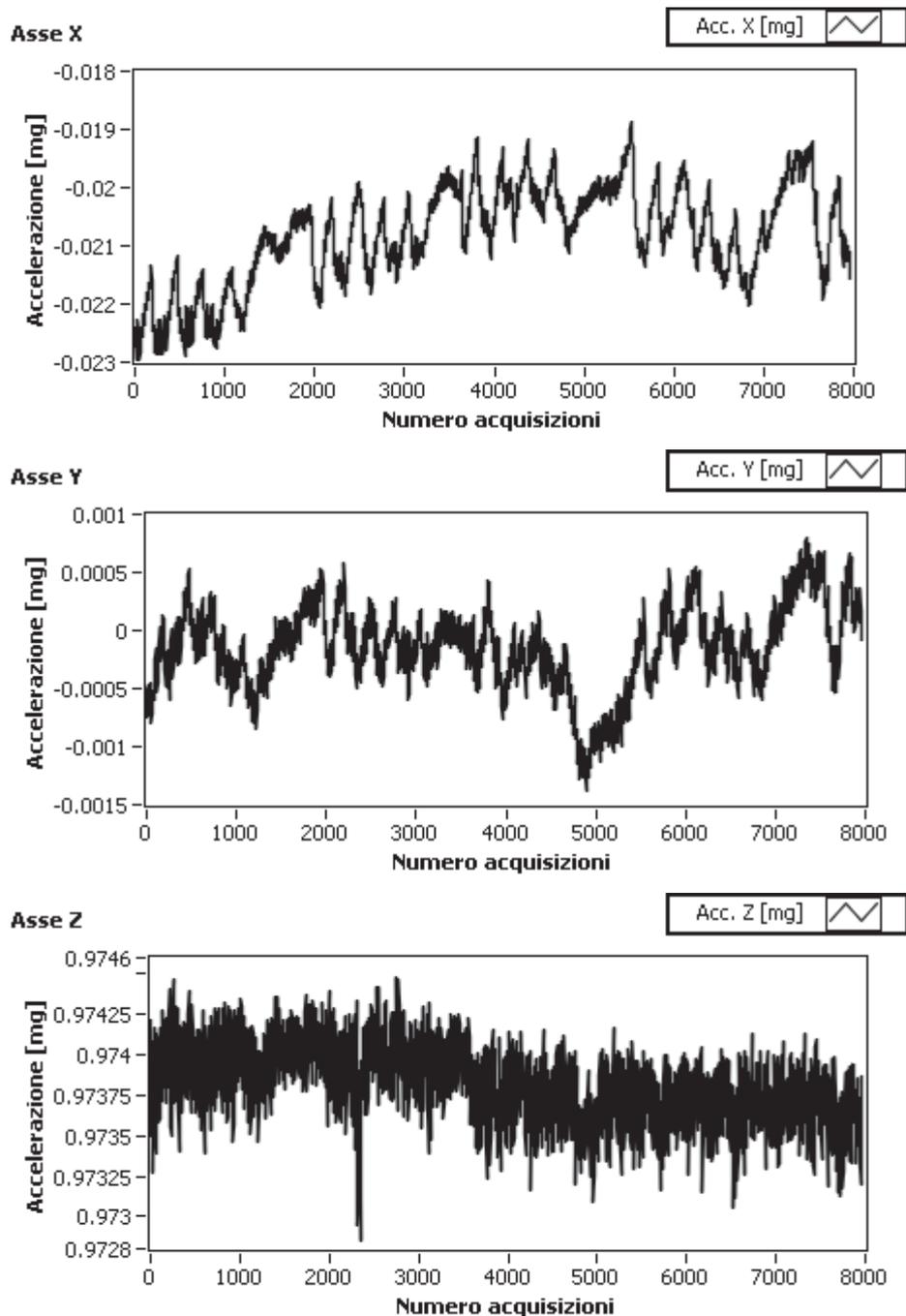


Figura 36: Grafici che rappresentano l'uscita, in unità di g (mg), in funzione del numero di acquisizioni, per i tre assi dell'accelerometro nella configurazione con doppia stabilizzazione.

Quando saranno state apportate le modifiche sulla stabilizzazione, sarà necessario testare nuovamente il comportamento del sistema su lunghi periodi di misura, per valutare l'esistenza di eventuali derive nei dati. È molto probabile che tale fenomeno avvenga, poiché ci si aspetta che le caratteristiche dei sensori, nonostante essi siano molto stabili, varino nel tempo, e su lunghi periodi non possano essere trascurate. Le soluzioni a questo problema possono essere di diverso tipo, ma richiedono lo studio approfondito del fenomeno che, se presente, è attualmente sovrastato da altri effetti, che devono essere eliminati prima di poter procedere all'ulteriore ottimizzazione del sistema.

Conclusioni

Il lavoro di ricerca svolto per lo sviluppo di questo sistema di misura ha permesso di raggiungere risultati incoraggianti per la prospettiva d'impiego degli accelerometri MEMS nelle misure inclinometriche di monitoraggio delle frane.

La validità di un sistema di questo tipo è subordinata al superamento di diversi fattori di criticità, fra cui: la risoluzione dei sensori, la ripetibilità delle misure, la longevità della strumentazione e il suo costo.

È importante considerare che i sensori MEMS nascono per rispondere a esigenze ben diverse da quelle per cui sono stati utilizzati in questo progetto. I produttori, infatti, popolano i loro cataloghi basandosi sui settori del mercato in cui è possibile vendere grandi quantità di componenti (decine o centinaia di milioni). Questo discorso vale in particolare per gli accelerometri che, assieme ai giroscopi MEMS, sono largamente diffusi nei sistemi di posizionamento, ormai parti

integranti di molti oggetti che usiamo nella vita quotidiana (cellulari, GPS, playstation, hard disk, ecc.).

Una prova di quanto detto viene dal fatto che, per quanto riguarda gli accelerometri, non c'è un reale interesse dei progettisti delle case produttrici ad aumentarne la risoluzione. Al momento della redazione di questa tesi, i sensori utilizzati in questo sistema di misura (LIS3L02AL di ST Microelectronics) sono stati sostituiti sul mercato dalla generazione successiva (LIS344ALH). Le principali differenze, fra questo nuovo prodotto e quello da noi utilizzato, risiedono nelle dimensioni e nel consumo, mentre la risoluzione è rimasta la stessa, come anche la dipendenza dalla temperatura del livello di zero e della sensibilità. Ovviamente queste migliorie sono vantaggiose, poiché la riduzione dei consumi permette di aprire la strada a nuove soluzioni e ambiti di utilizzo. La miniaturizzazione però ha lo svantaggio di rendere più complicate le operazioni di sviluppo del prototipo. La diffusione dei componenti elettronici SMD (Surface Mounted Device) ha infatti reso estremamente difficoltose le operazioni di assemblaggio dei circuiti elettronici, per cui è necessario ricorrere a aziende specializzate, perdendo l'opportunità di eseguire test preliminari approfonditi, in laboratorio.

Per queste ragioni, prima di apportare modifiche al sistema realizzato, abbiamo eseguito il maggior numero di test possibili e studiato i problemi che affliggono l'attuale versione.

Le prove che abbiamo eseguito per confrontare le sonde inclinometriche basate su MEMS e uno strumento commerciale equipaggiato con inclinometri servo-meccanici, hanno confermato che gli accelerometri da noi utilizzati sono idonei per questo tipo di misure. Nonostante essi siano dotati di una risoluzione di $2 \cdot 10^{-4}$ rad, mentre gli inclinometri servo-meccanici raggiungono $2 \cdot 10^{-5}$ rad, tale divario è attenuato dalle caratteristiche complessive del sistema di misura e del sito di monitoraggio.

Gli errori che intervengono, a causa dei giochi presenti nelle parti meccaniche che costituiscono il carrello su cui è installata la sonda,

contribuiscono ad assottigliare il divario prestazionale fra i sensori. Inoltre, le guide dei tubi inclinometrici, col passare del tempo diventano irregolari, poiché subiscono forti pressioni all'interno della frana (che ne modificano la forma) e sono soggette a incrostazioni, talvolta in grado di rendere inutilizzabile un sito di misura. Queste ipotesi sono confermate dai risultati che abbiamo ottenuto con i confronti, e quindi riteniamo che l'inclinometro MEMS, se opportunamente calibrato, possa essere utilizzato per queste misure, limitando al 2-3% l'errore commesso rispetto a una sonda di maggiore sensibilità. Questo primo risultato costituisce la premessa necessaria per sviluppare il sistema di monitoraggio *fisso*.

I risultati ottenuti con il prototipo installato sulla frana di Lezza Nuova, hanno confermato che le modifiche apportate per eliminare le derive meccaniche presenti inizialmente, sono state efficaci e hanno reso il problema trascurabile. Anche questo è un ottimo risultato, poiché la struttura complessiva del sistema è rimasta fedele alle caratteristiche iniziali, che consentono di ridurre i costi di realizzazione.

Nonostante la presenza di problemi legati all'alimentazione dei sensori, per i quali abbiamo individuato una soluzione efficace, i risultati che abbiamo ricavato dalle misure sono coerenti. Dobbiamo tenere presente che non ci troviamo in condizioni ideali, quindi sarebbe azzardato trarre conclusioni certe, siano esse positive o negative. Tuttavia, abbiamo potuto constatare che gli spostamenti rilevati non contrastano con la situazione riscontrata sulla frana.

Uno dei vantaggi più interessanti offerti da questo sistema di misura è la notevole quantità di dati che possono essere raccolti. Da Novembre 2009, infatti, le acquisizioni sono eseguite con frequenza oraria, in maniera completamente automatica.

I risultati ottenuti finora, consentono di pianificare future attività di ricerca, volte a migliorare e ampliare le funzionalità del nostro sistema:

- i sensori di temperatura presenti su ogni inclinometro hanno consentito di raccogliere una notevole quantità di dati indicativi della trasmissione del calore nel terreno;
- I dati sulla temperatura possono offrire informazioni anche sulla diffusività termica del suolo, che dipende dal materiale che lo compone e dal suo contenuto di acqua;
- Una delle opportunità di approfondimento, in parte avviata ma non possibile da completare all'interno di questa tesi, è legata allo studio della correlazione fra l'andamento della temperatura nel terreno e il livello delle precipitazioni, che sono una delle cause d'innescio dei movimenti franosi. Nell'appendice B sono riportati dei grafici che introducono questo argomento, in maniera indicativa;
- La natura modulare del sistema di monitoraggio consente inoltre di aggiungere altri tipi di sensori, quali piezometri e celle di carico, che possono integrare il corredo d'informazioni a disposizione per lo studio dell'evoluzione del fronte franoso;
- Ultimo, ma non meno importante, la verifica della potenzialità di un simile sistema di misura per attivare condizioni di allarme per le situazioni di rapido incremento della deformazione degli strati del terreno, finalizzate ad interventi da parte delle autorità locali e/o della Protezione Civile.

Appendice A

In questa appendice sono inseriti i grafici che riguardano i dati raccolti dal sistema di monitoraggio installato sulla frana di Lezza Nuova, nell'Appennino modenese.

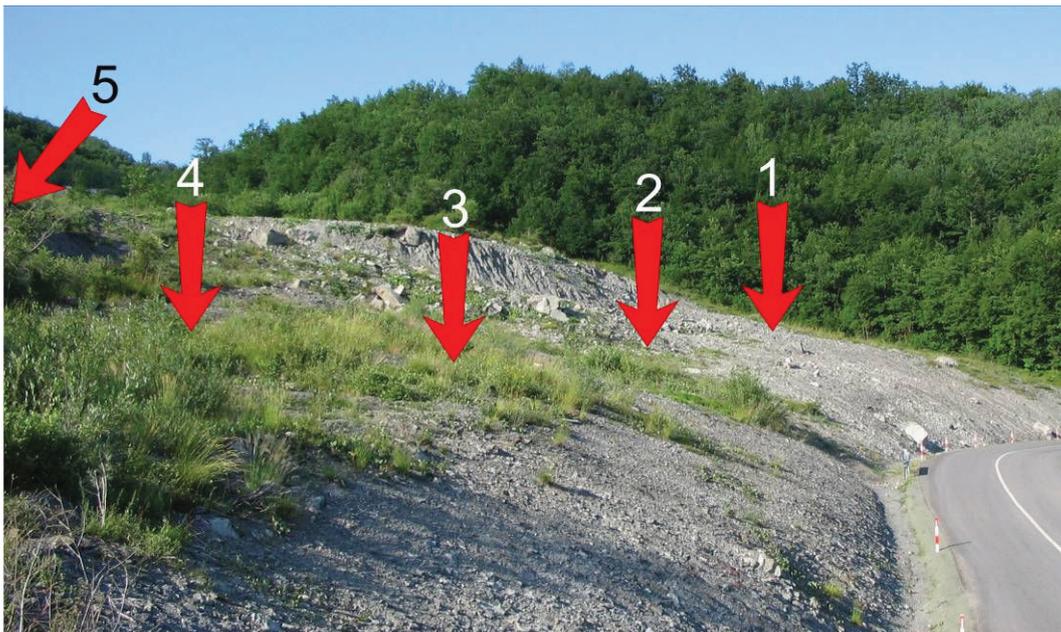


Figura 1: Fotografia della frana di Lezza Nuova, nell'Appennino modenese. Le frecce indicano i punti in cui sono situati i 5 *aghi* del sistema di monitoraggio.

I punti di misura in cui gli *aghi* sono stati aggiornati all'ultima versione, in cui si utilizzano i contenitori in PVC per gli inclinometri, sono il numero 1 e il 5. I dati riguardano il periodo che va dall'aggiornamento (diverso per i due *aghi*) al 7 febbraio 2010.

Fino al 14 novembre 2009 le interrogazioni del sistema sono avvenute con frequenza giornaliera. Da quella data in poi, invece, si è proceduto con frequenza oraria.

Punto di misura 5 (aggiornato all'ultima versione il 14 novembre 2009)

5 - Tensione d'alimentazione scheda di superficie

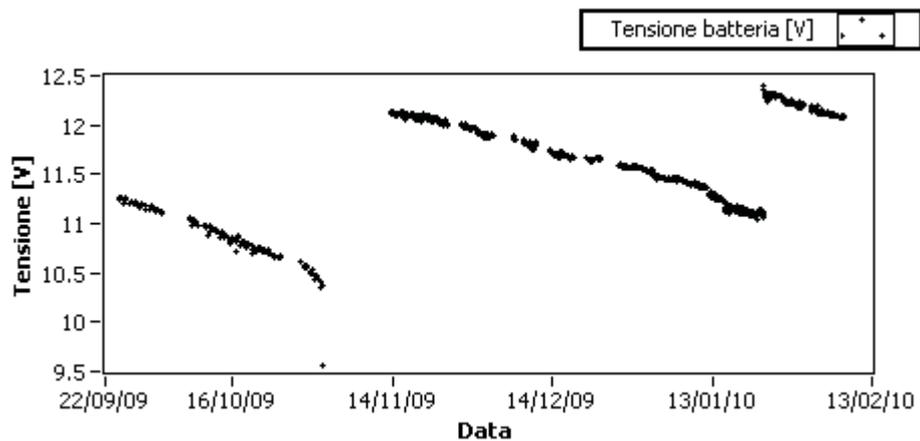


Figura 2: Livello di tensione d'alimentazione della scheda di superficie del punto 5. Si tratta della tensione proveniente dalla batteria, dopo che ha subito le cadute di tensione dovute ai 4 *aghi* precedenti.

5 - Tensione stabilizzata in superficie

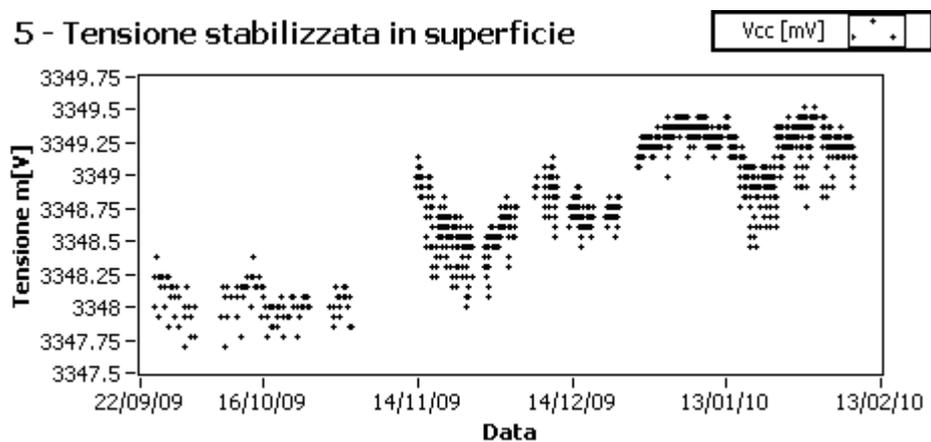


Figura 3: Andamento del livello della tensione stabilizzata sulla scheda di superficie 5, in funzione del tempo.

1. Accelerometro situato a 2 metri di profondità

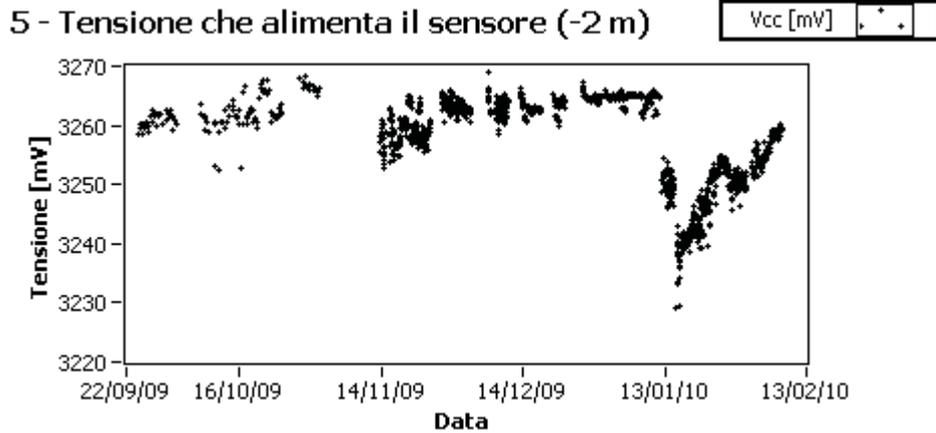


Figura 4: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 5 situato alla profondità di 2 metri.

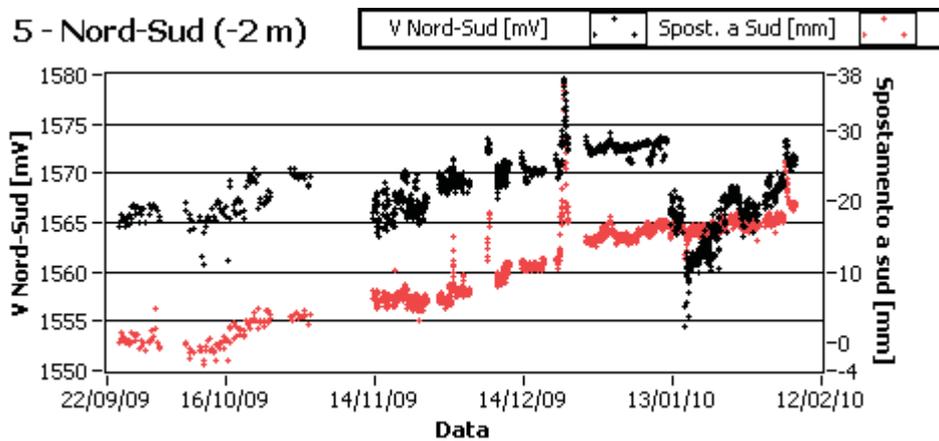


Figura 5: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 2 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

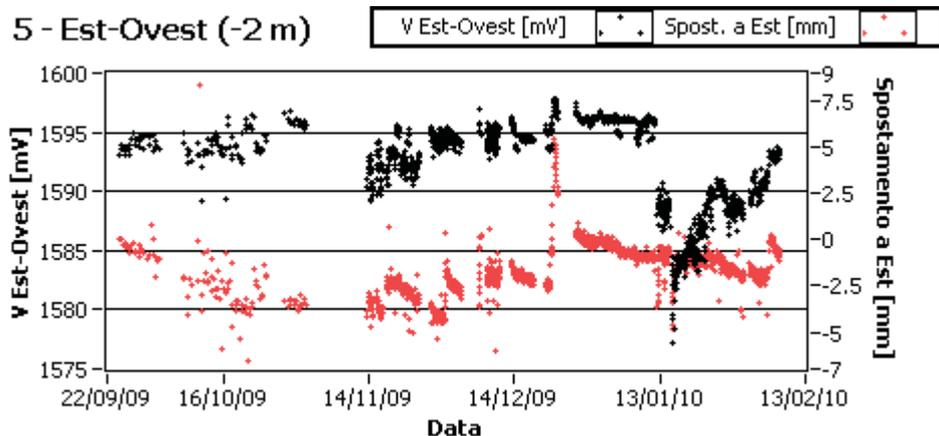


Figura 6: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 2 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

2. Accelerometro situato a 4 metri di profondità

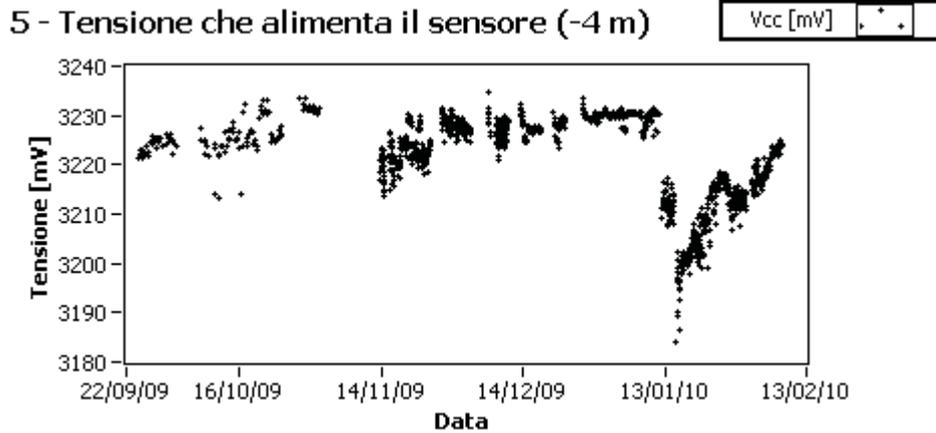


Figura 7: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 5 situato alla profondità di 4 metri.

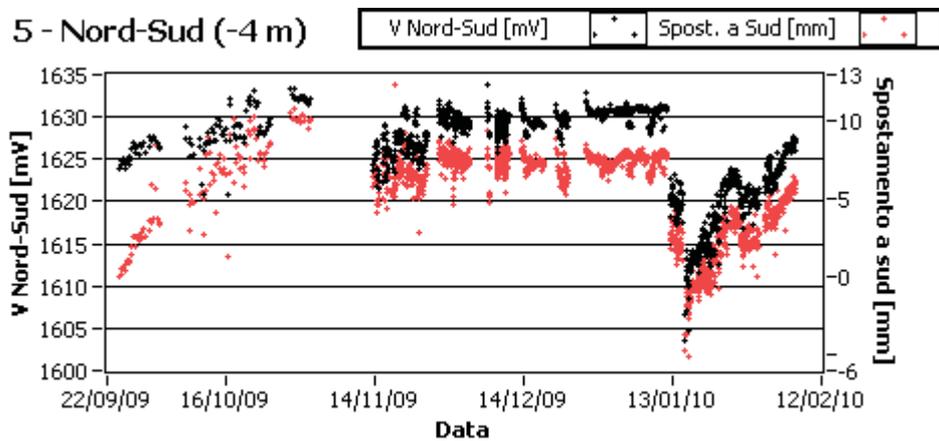


Figura 8: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 4 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

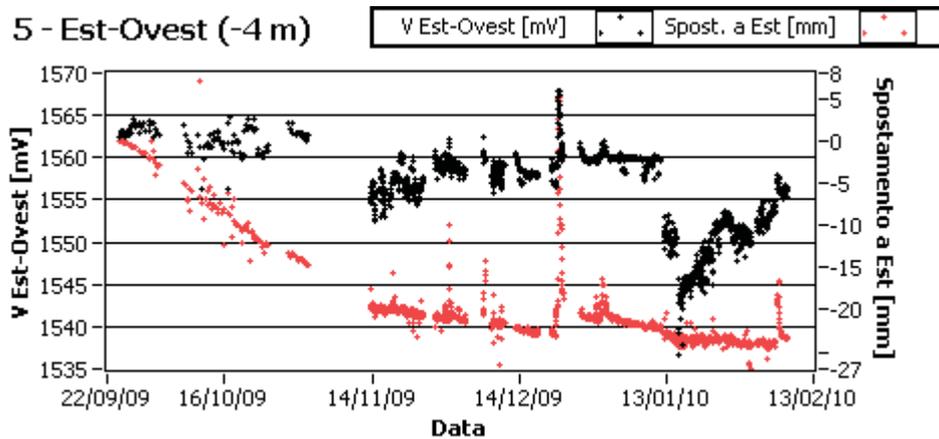


Figura 9: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 4 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

3. Accelerometro situato a 6 metri di profondità

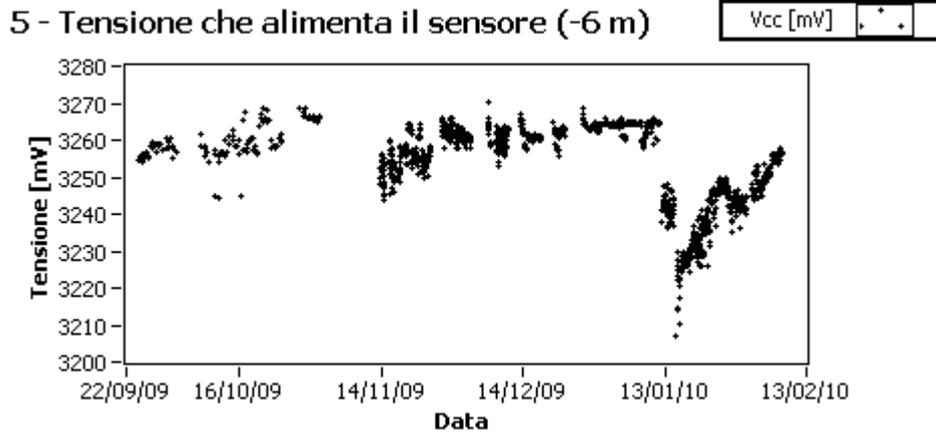


Figura 10: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 5 situato alla profondità di 6 metri.

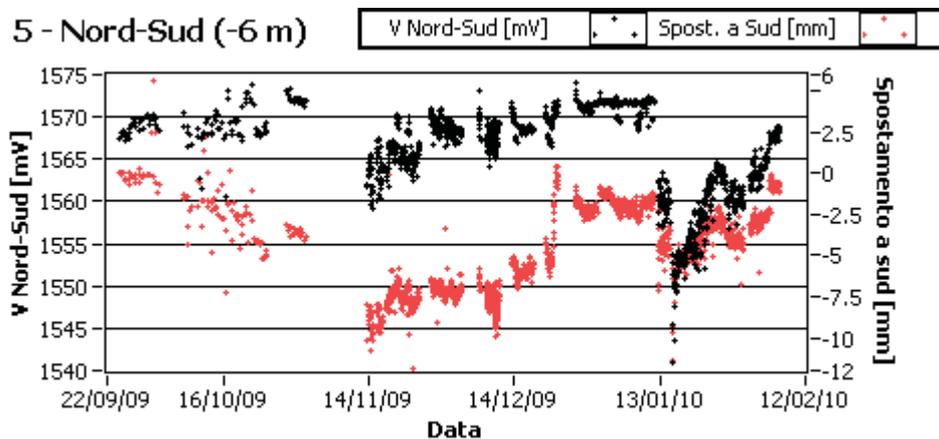


Figura 11: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 6 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

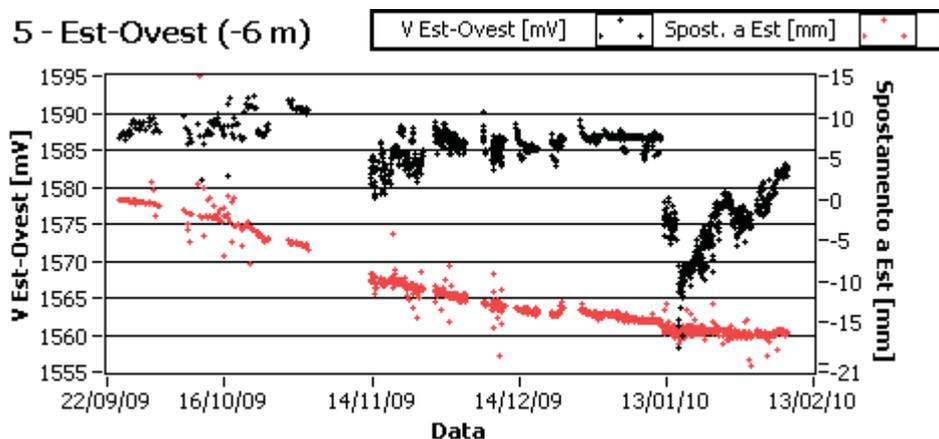


Figura 12: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 6 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

4. Accelerometro situato a 8 metri di profondità

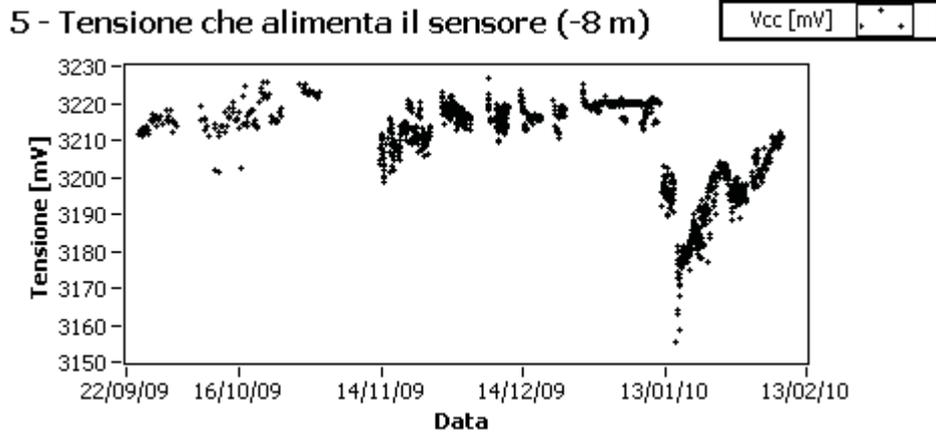


Figura 13: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 5 situato alla profondità di 8 metri.

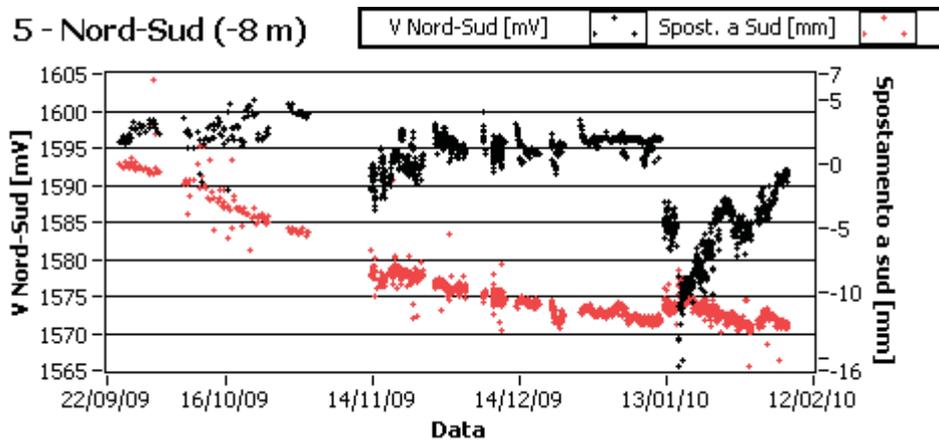


Figura 14: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 8 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

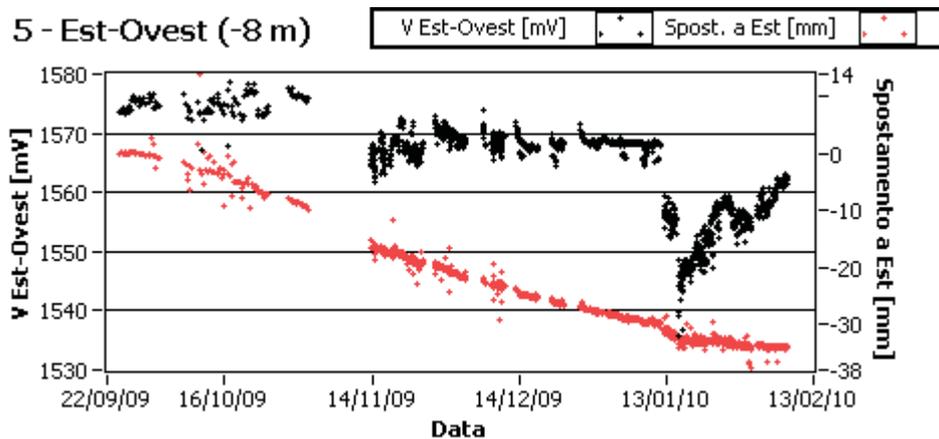


Figura 15: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 8 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

5. Accelerometro situato a 10 metri di profondità

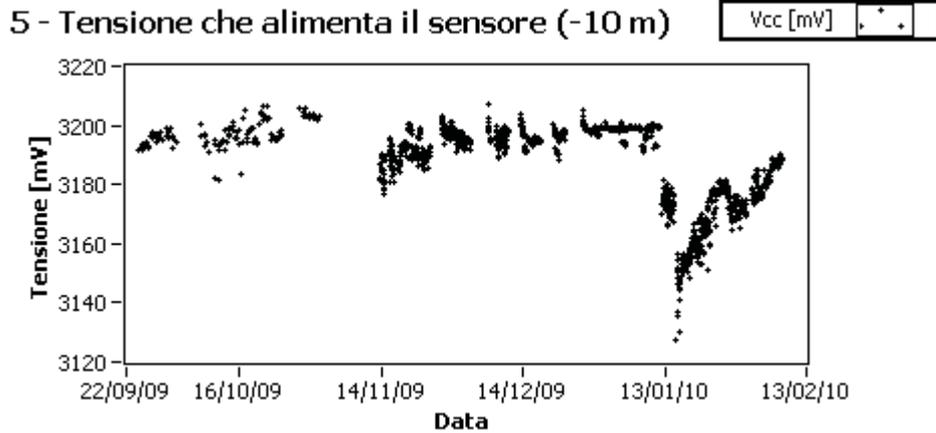


Figura 16: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 5 situato alla profondità di 10 metri.

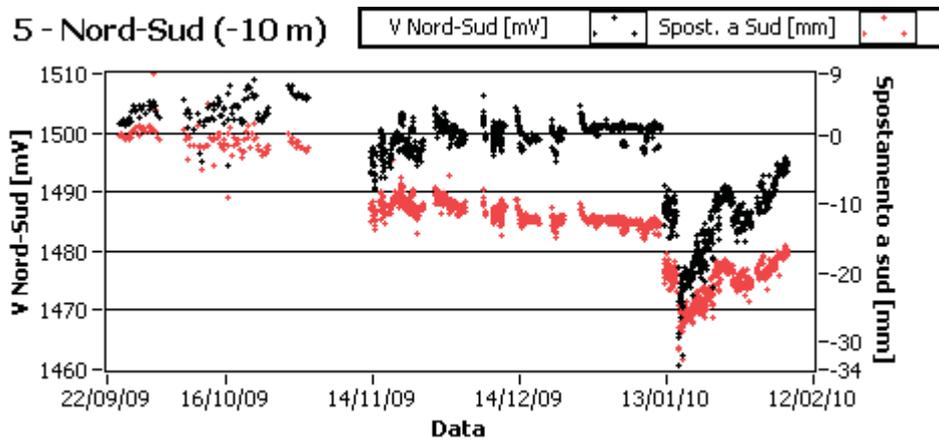


Figura 17: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 10 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

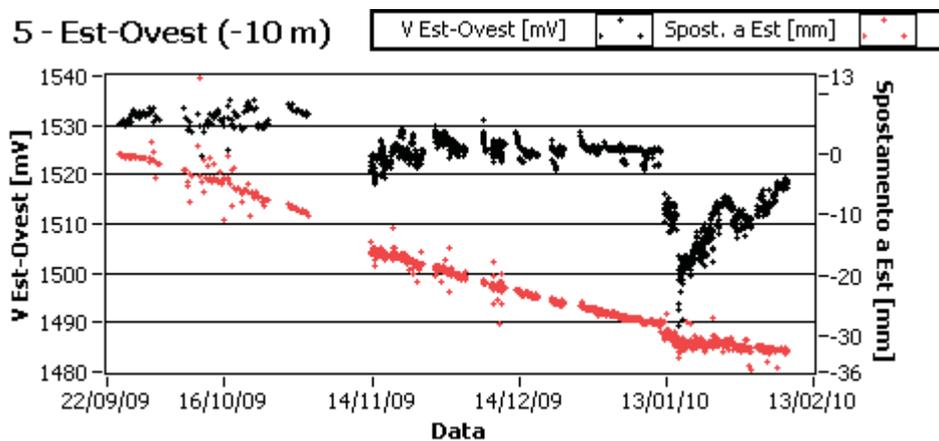


Figura 18: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 10 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

6. Accelerometro situato a 12 metri di profondità

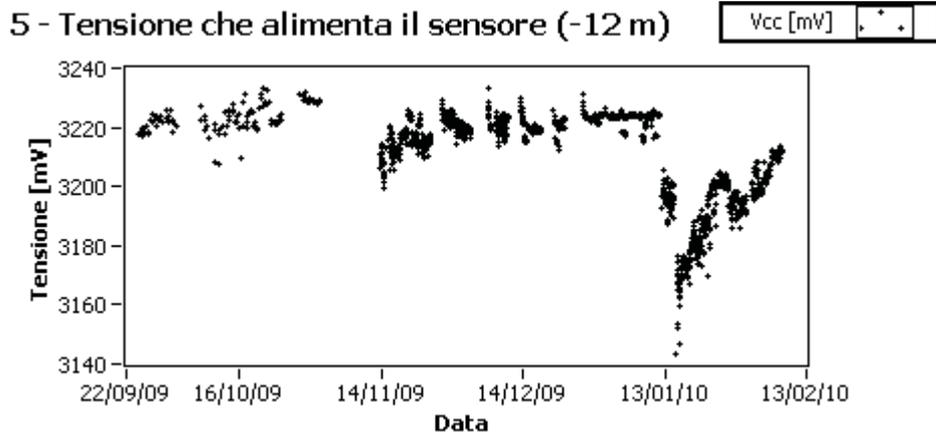


Figura 19: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 5 situato alla profondità di 12 metri.

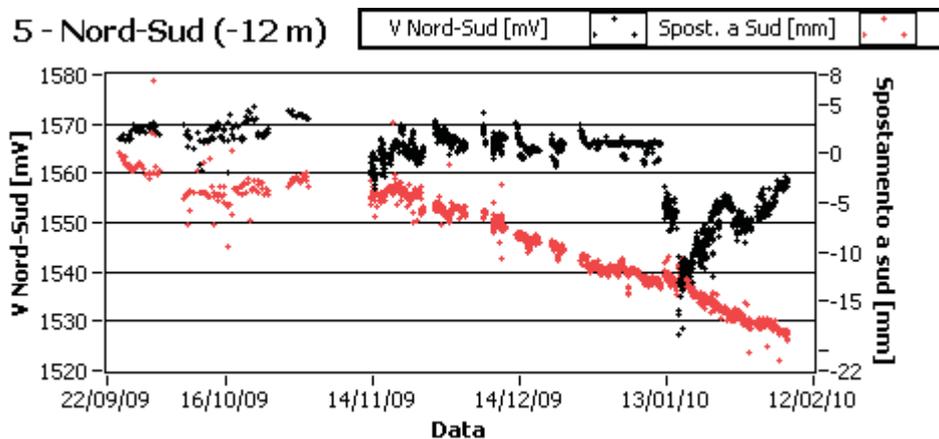


Figura 20: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 12 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

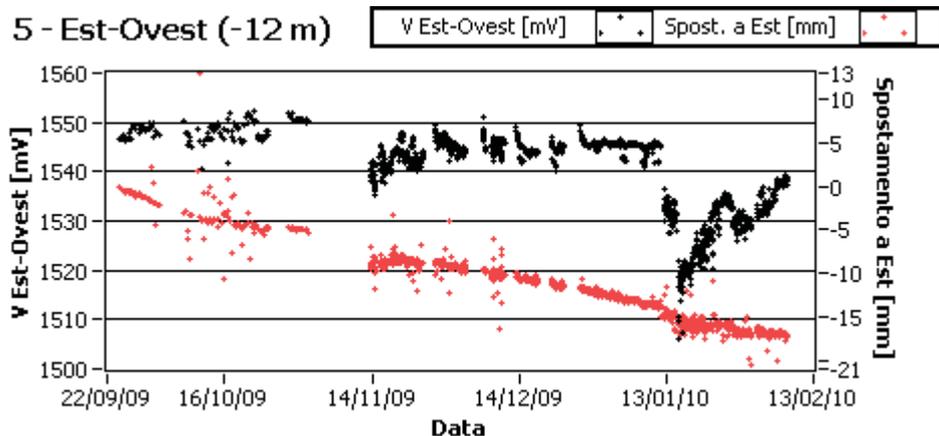


Figura 21: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 5, situato alla profondità di 12 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

Punto di misura 1 (Aggiornato all'ultima versione il 24 settembre 2009)

1 - Tensione d'alimentazione scheda di superficie (batteria)

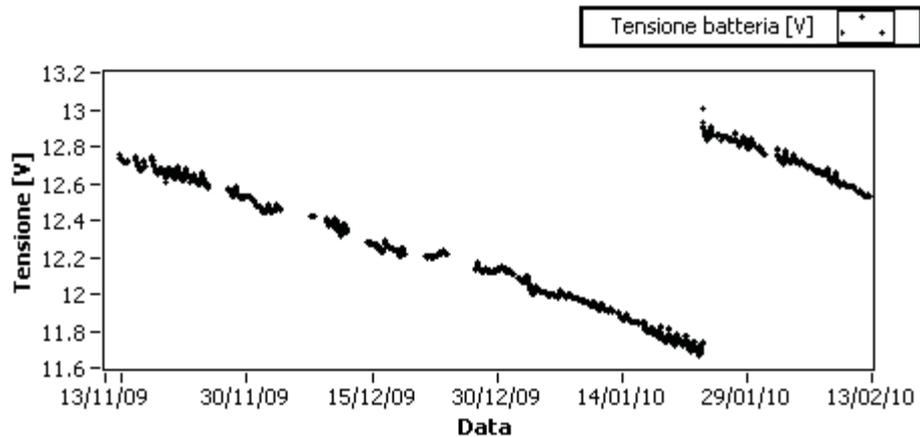


Figura 22: Livello di tensione d'alimentazione della scheda di superficie del punto 1. Questa scheda fornisce l'informazione sul livello della batteria, poiché è collegata direttamente a essa, senza altre schede interposte.

1 - Tensione stabilizzata in superficie (Vcc)

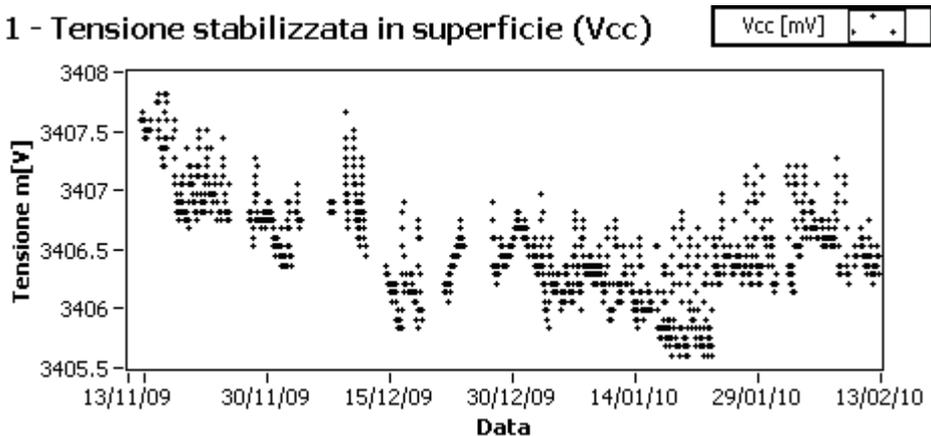


Figura 23: Andamento del livello della tensione stabilizzata sulla scheda di superficie 1, in funzione del tempo.

1. Accelerometro situato a 2 metri di profondità

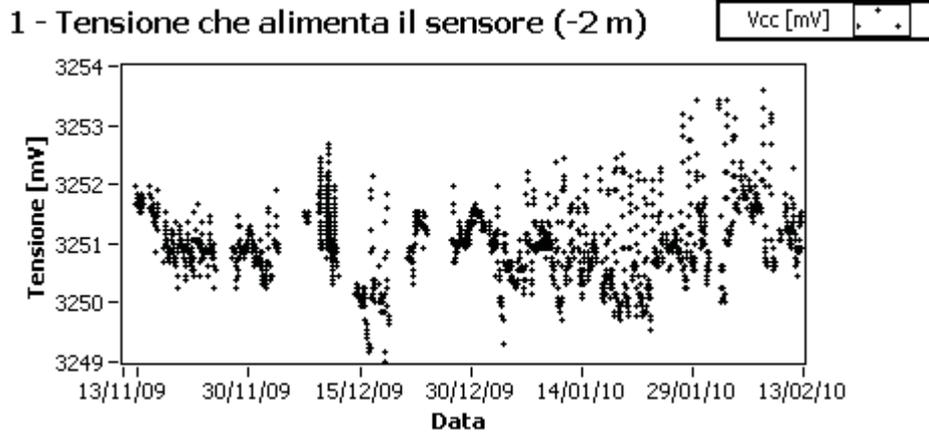


Figura 24: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 1 situato alla profondità di 2 metri.

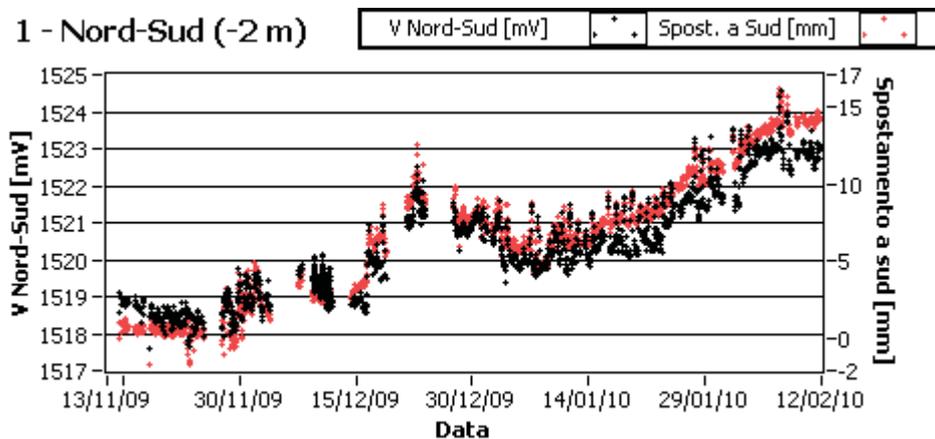


Figura 25: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 2 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

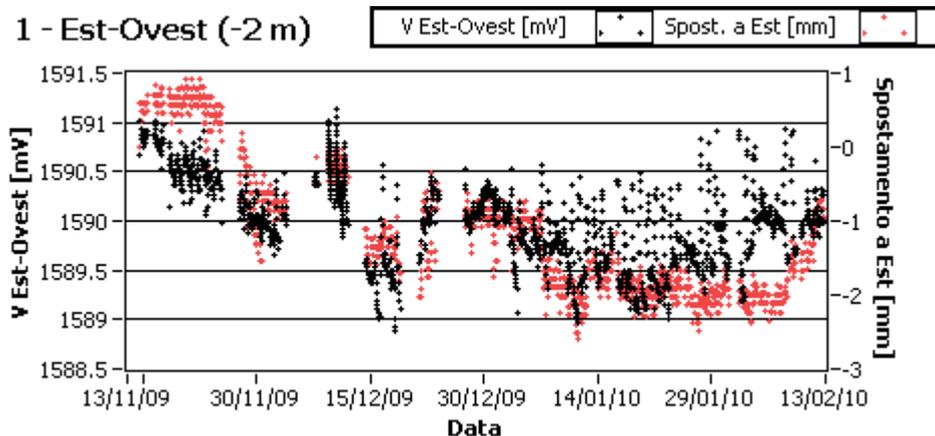


Figura 26: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 2 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

2. Accelerometro situato a 4 metri di profondità

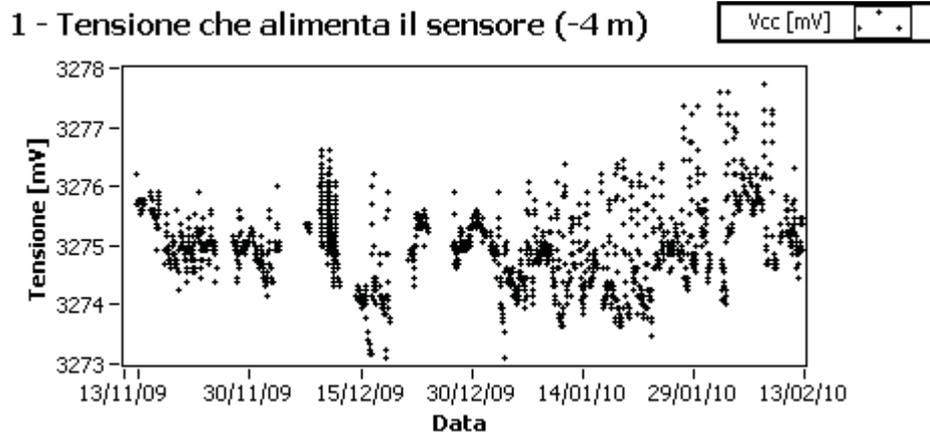


Figura 27: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 1 situato alla profondità di 4 metri.

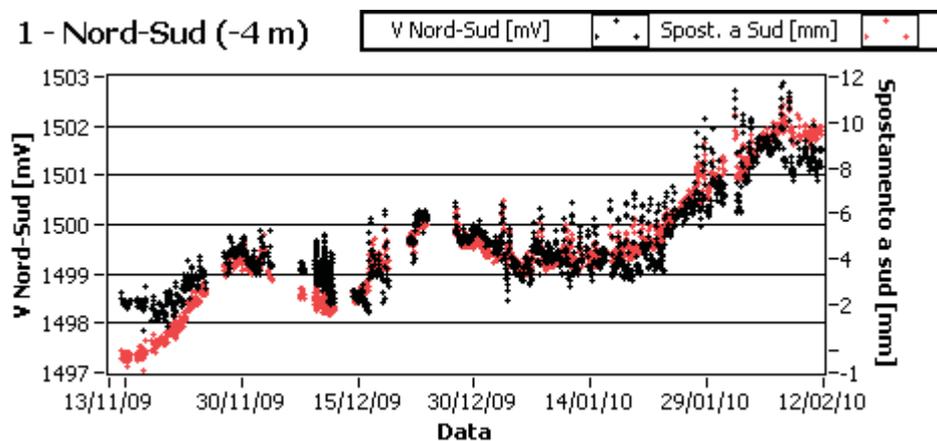


Figura 28: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 4 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

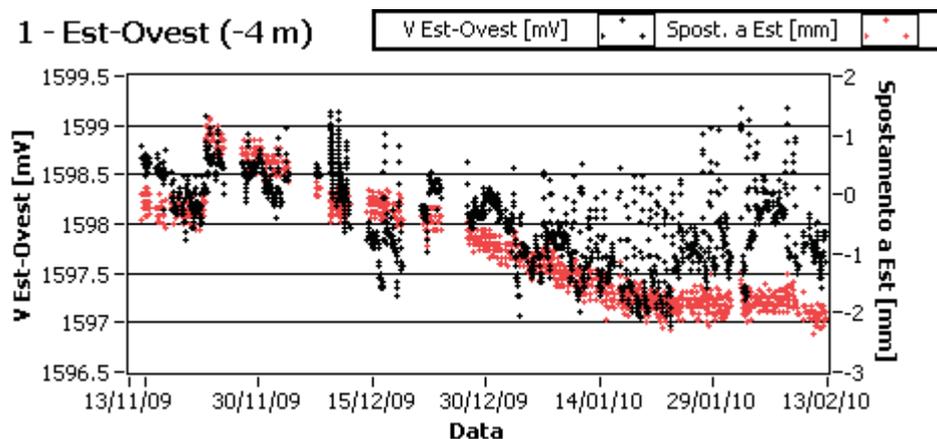


Figura 29: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 4 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

3. Accelerometro situato a 6 metri di profondità

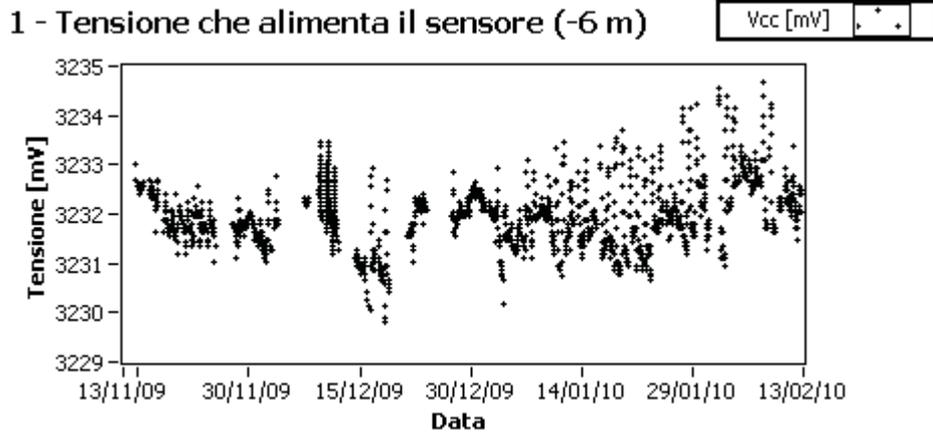


Figura 30: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 1 situato alla profondità di 6 metri.

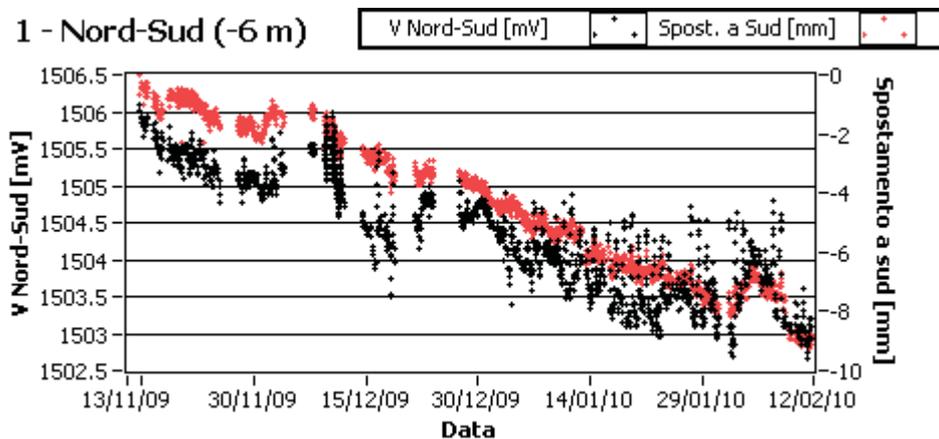


Figura 31: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 6 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

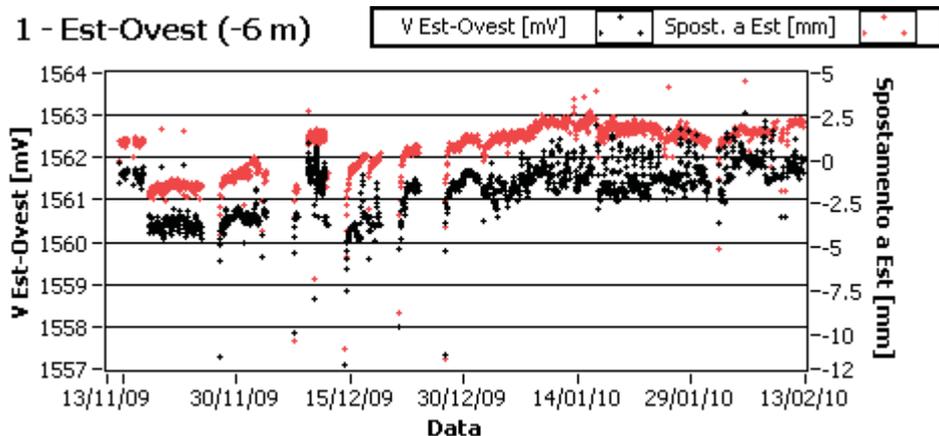


Figura 32: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 6 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

4. Accelerometro situato a 8 metri di profondità

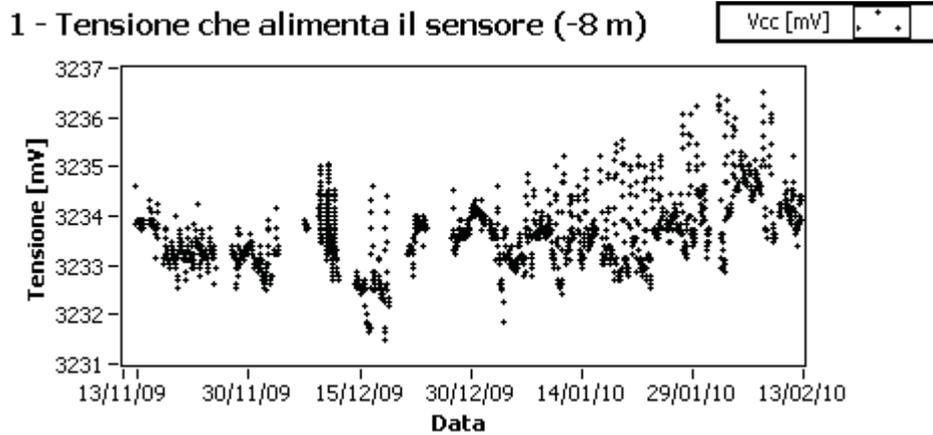


Figura 33: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 1 situato alla profondità di 8 metri.

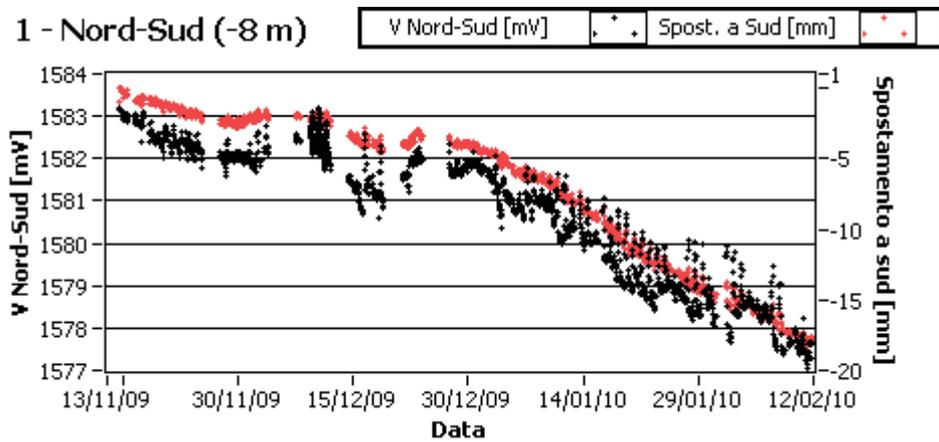


Figura 34: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 8 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

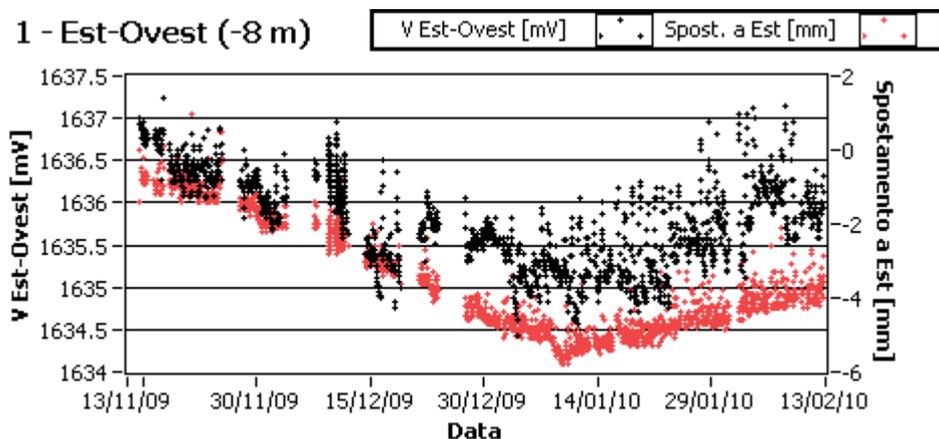


Figura 35: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 8 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

5. Accelerometro situato a 10 metri di profondità

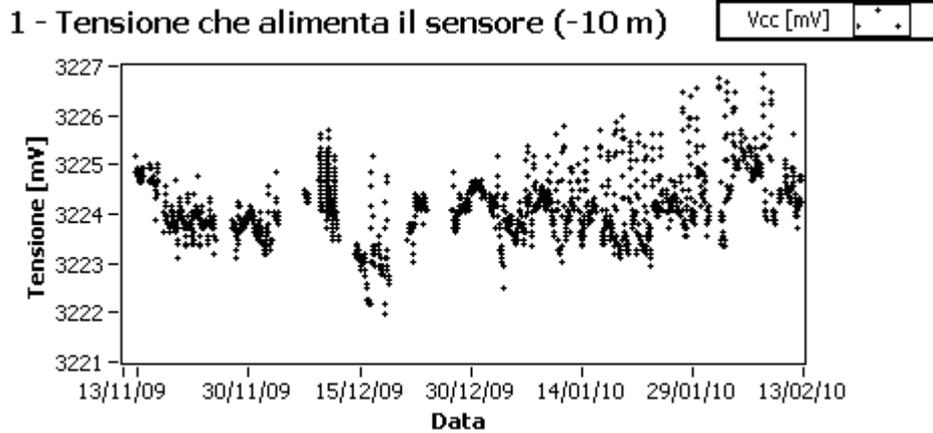


Figura 36: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 1 situato alla profondità di 10 metri.

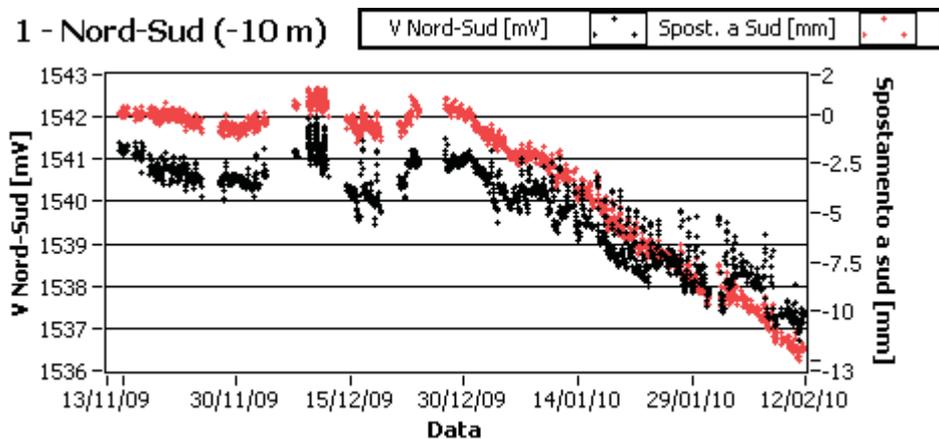


Figura 37: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 10 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

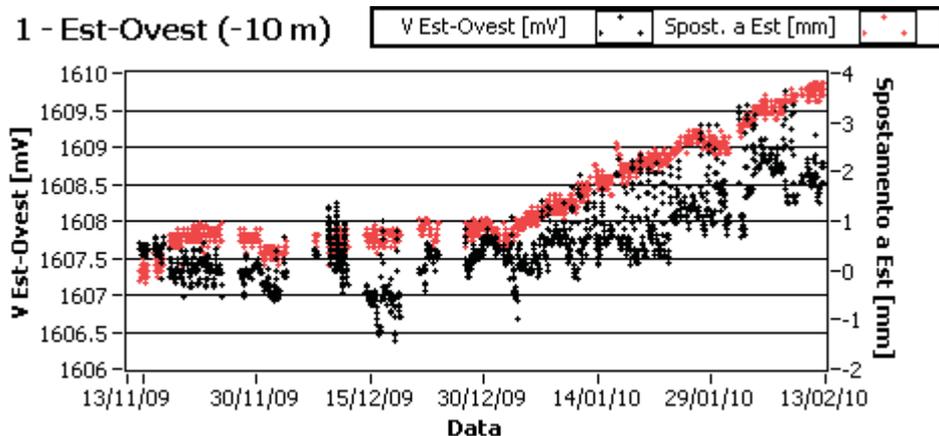


Figura 38: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 10 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

6. Accelerometro situato a 12 metri di profondità

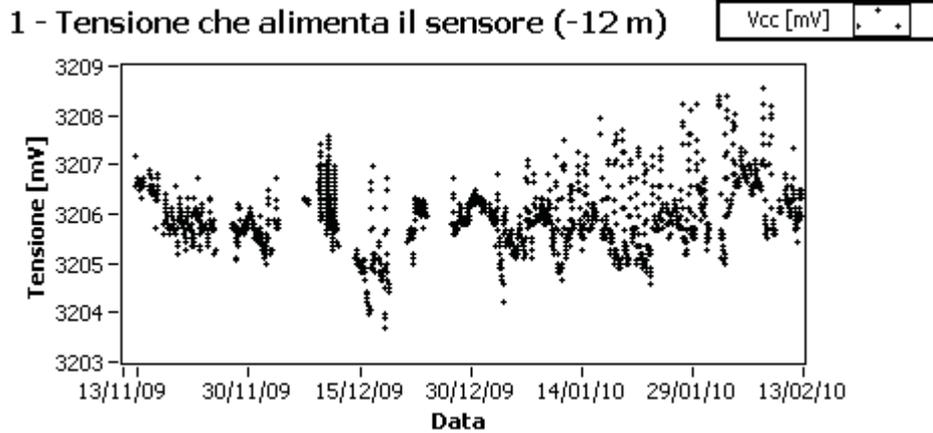


Figura 39: Andamento della tensione d'alimentazione dell'accelerometro dell'ago 1 situato alla profondità di 12 metri.

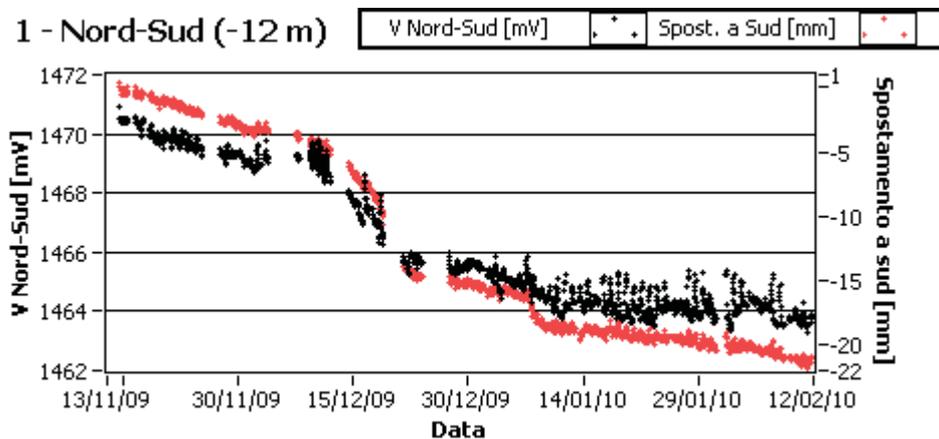


Figura 40: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse z (direzione Nord-Sud) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 12 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

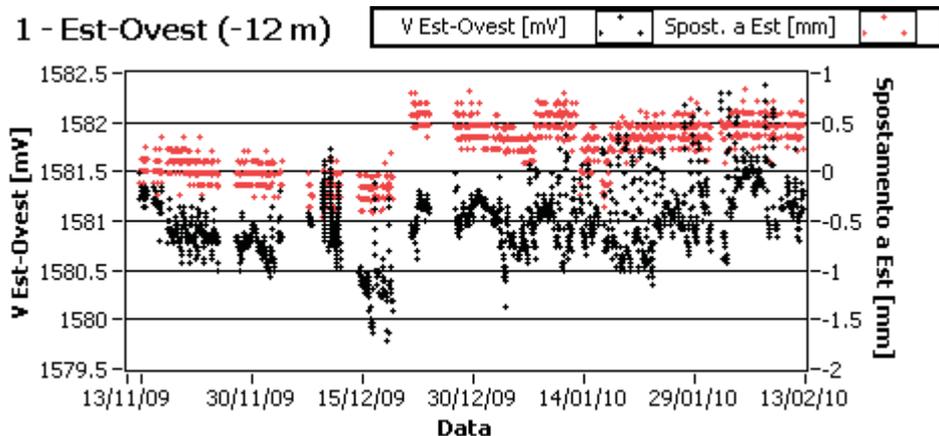


Figura 41: Andamento dell'uscita (mV) dell'asse y (direzione Est-Ovest) dell'accelerometro dell'ago 1, situato alla profondità di 12 metri. La curva in rosso indica lo spostamento verso Sud (non si indica lo spostamento verso Nord per via della geometria del sistema: in questo modo è più facile confrontare l'andamento delle due curve nel grafico) rispetto alla prima misura.

Appendice B

In questa appendice sono inseriti i grafici che riguardano i dati di temperatura raccolti dal sistema di monitoraggio installato sulla frana di Lezza Nuova, nell'Appennino modenese.

In più di 2 anni di funzionamento abbiamo misurato la temperatura del terreno a diverse profondità, al fine di poter correggere la deriva termica degli accelerometri. Da una prima sommaria analisi, i dati si sono rivelati in accordo con l'equazione che descrive l'andamento della temperatura nel suolo a diverse profondità (Kirkham, 1972)

$$T(z,t) = T_m + ae^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2D_T}}} \sin\left[\omega t + z\sqrt{\frac{\omega}{2D_T}} + \phi\right]$$

dove: T_m è la temperatura media del terreno; a è l'ampiezza di picco della temperatura in superficie; $\omega = 2\pi/T$, con T periodo (365 gg.); z è la profondità [m]; t è il tempo (in giorni); D_T è la diffusività termica; ϕ è la fase iniziale che tiene conto del fatto che la temperatura a inizio anno ha il picco negativo.

Nelle pagine seguenti sono riportati i grafici delle temperature misurate in 4 punti (aghi) e un grafico che confronta la temperatura a 2 e 4 metri di profondità, con le precipitazioni.

In questa analisi sommaria la temperatura è indicata in [mV], tensione acquisita dal convertitore A/D dal sensore di temperatura integrato nel microprocessore dell'inclinometro. Il valore in [°C] può essere ricavato come si descrive nel capitolo 2, quando si descrivono le caratteristiche del misuratore di temperatura. È importante precisare, inoltre, che per esigenze manutentive o per la necessità di introdurre modifiche nel sistema di monitoraggio, gli inclinometri sono stati sostituiti e quindi, nei dati della temperatura, appaiono delle discontinuità dovute alle diverse caratteristiche che i sensori di temperatura presentano fra loro (livello di zero e sensibilità).

I grafici, pur nell'analisi sommaria presentata in questa appendice, sono stati riportati per sottolineare l'interesse che questo tipo di informazioni può avere per futuri studi.

Dai grafici nelle figure 1-4 si può notare che la temperatura ha andamento di tipo sinusoidale, in accordo con l'equazione indicata a pagina 141.

Si può notare come all'aumentare della profondità diminuisca l'escursione termica (ampiezza delle sinusoidi) e aumenti il ritardo temporale fra i picchi (fase delle sinusoidi).

Dai grafici delle figure 1-5 si può osservare come diminuiscano le anomalie rispetto a un andamento sinusoidale all'aumentare della profondità. In particolare, nella figura 5, il comportamento descritto, per le profondità 2 e 4 metri, è messo in relazione al livello delle precipitazioni (dati ottenuti dall'ARPA Emilia-Romagna, sistema DEXTER).

Questi dati forniscono una base di partenza stimolante per lo svolgimento di future ricerche e analisi, legate alla quantità di acqua contenuta nei diversi strati del terreno, con implicazioni sulla dinamica degli eventi franosi.

AGO 1

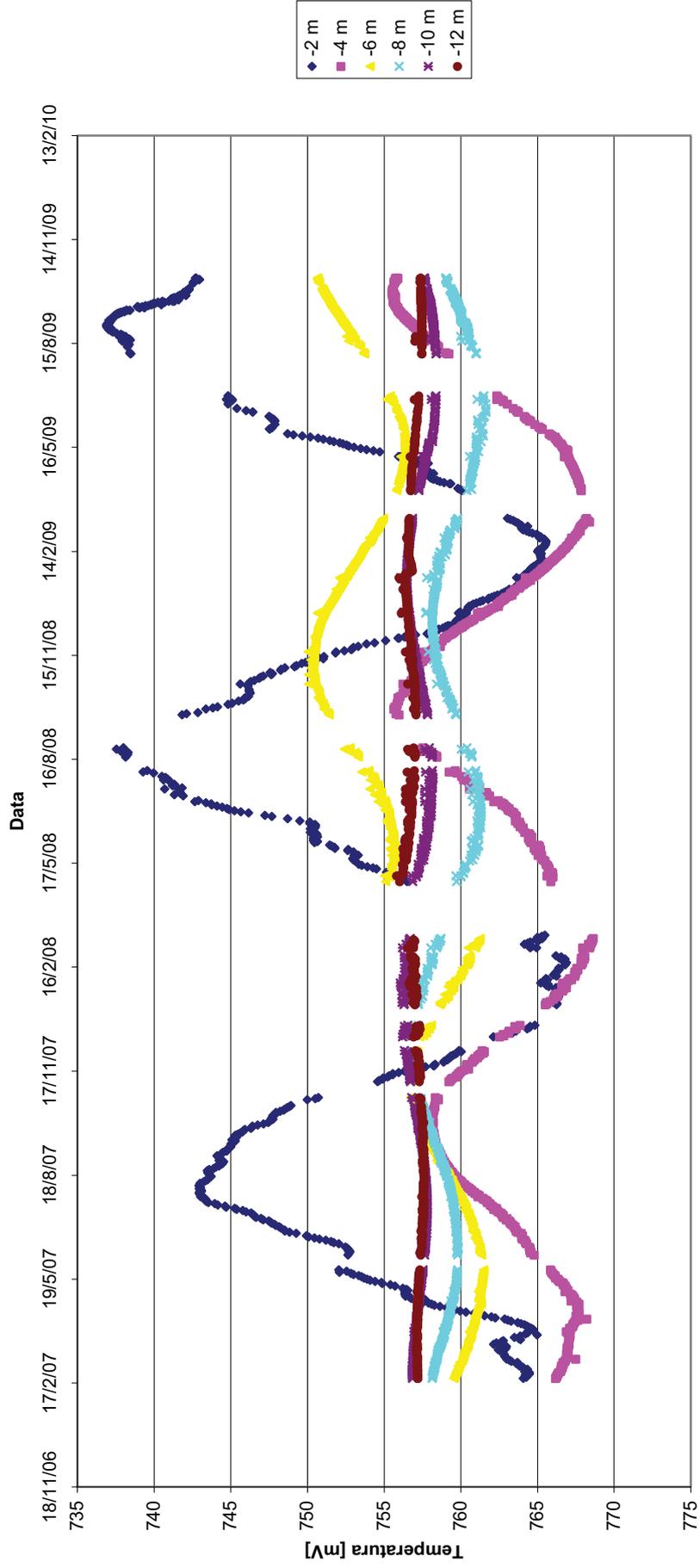


Figura 1: Grafico sommario della temperatura per l'ago 1 alle varie profondità. (La temperatura è data in millivolt)

AGO 2

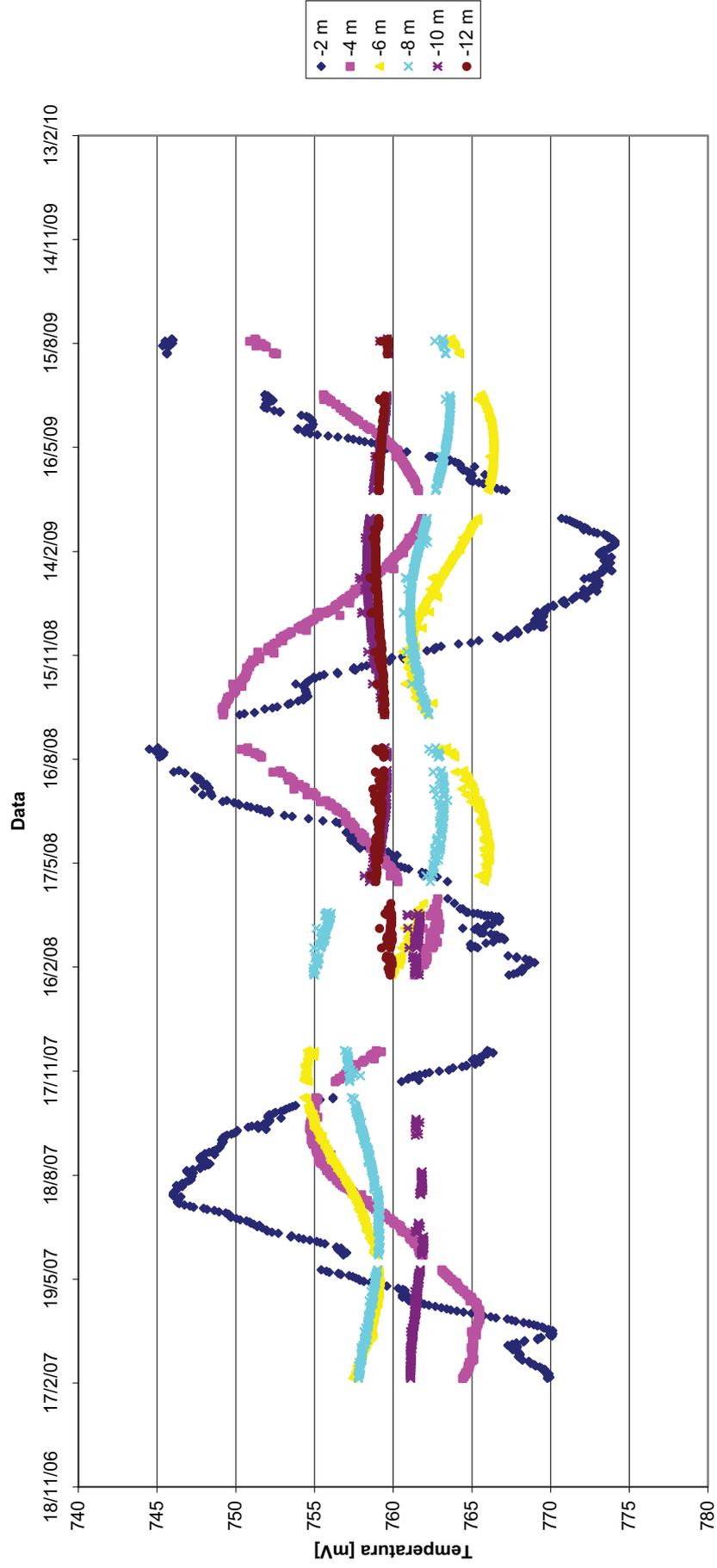


Figura 2: Grafico sommario della temperatura per l'ago 2 alle varie profondità. (La temperatura è data in millivolt)

AGO 4

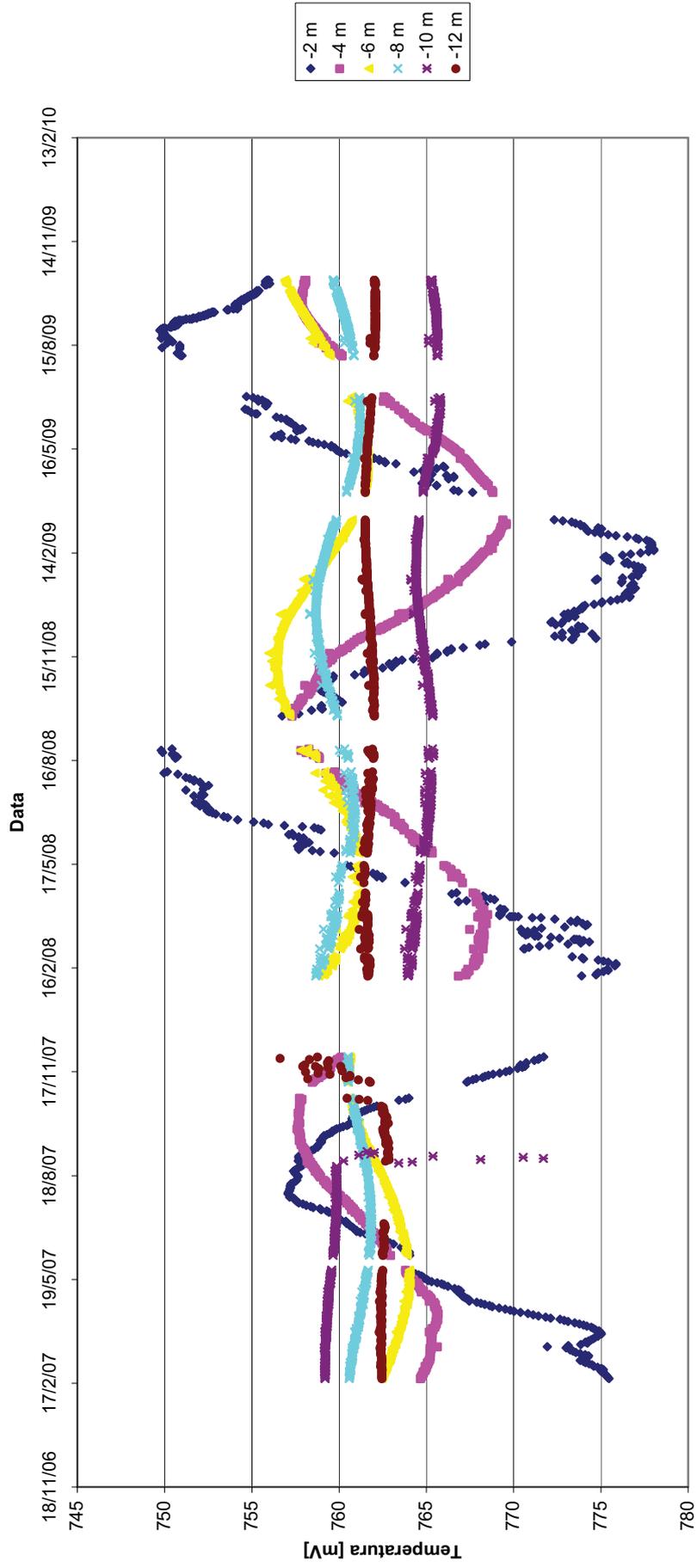


Figura 3: Grafico sommario della temperatura per l'ago 4 alle varie profondità. (La temperatura è data in millivolt)

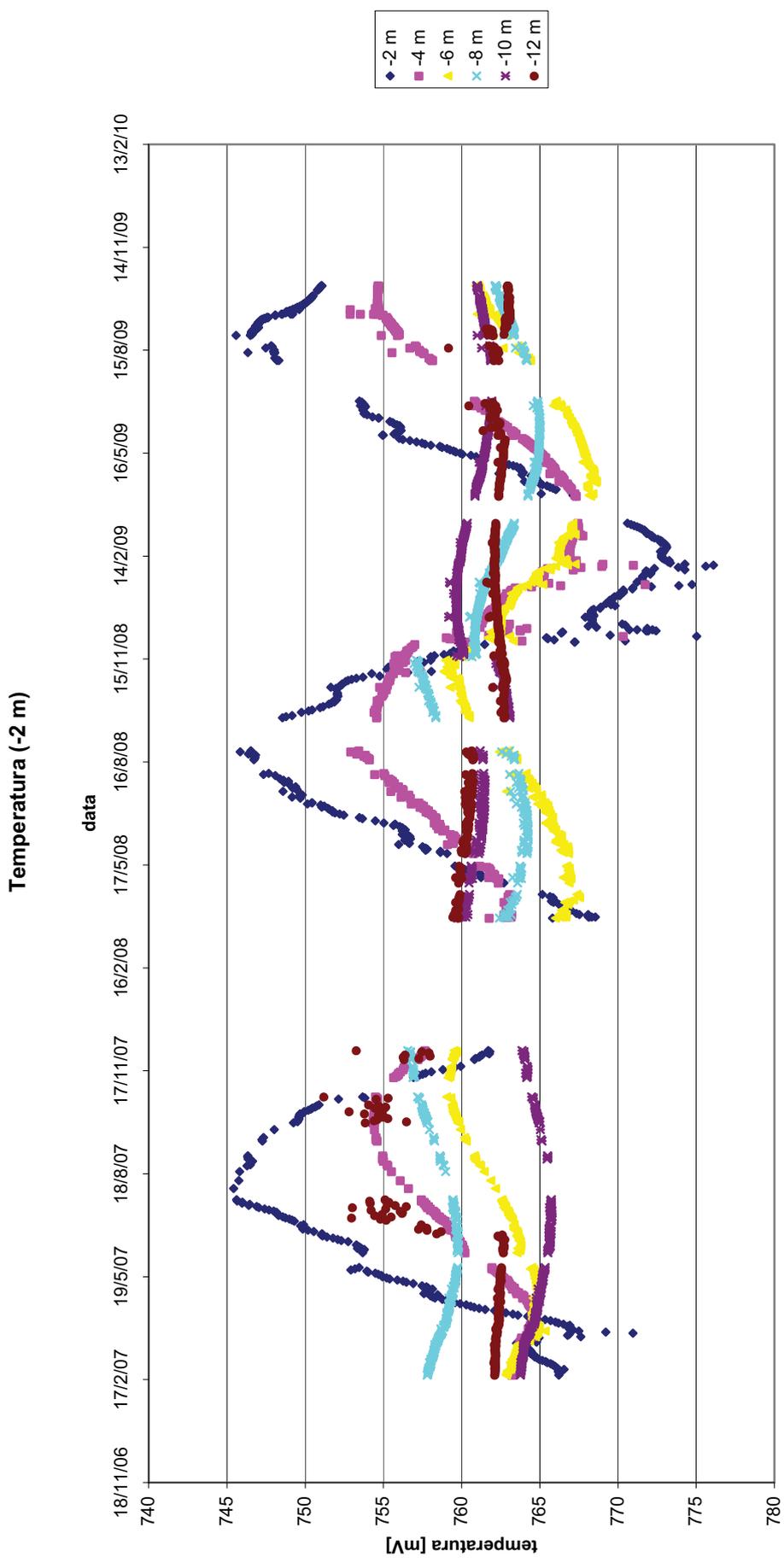


Figura 4: Grafico sommario della temperatura per l'ago 5 alle varie profondità. (La temperatura è data in millivolt)

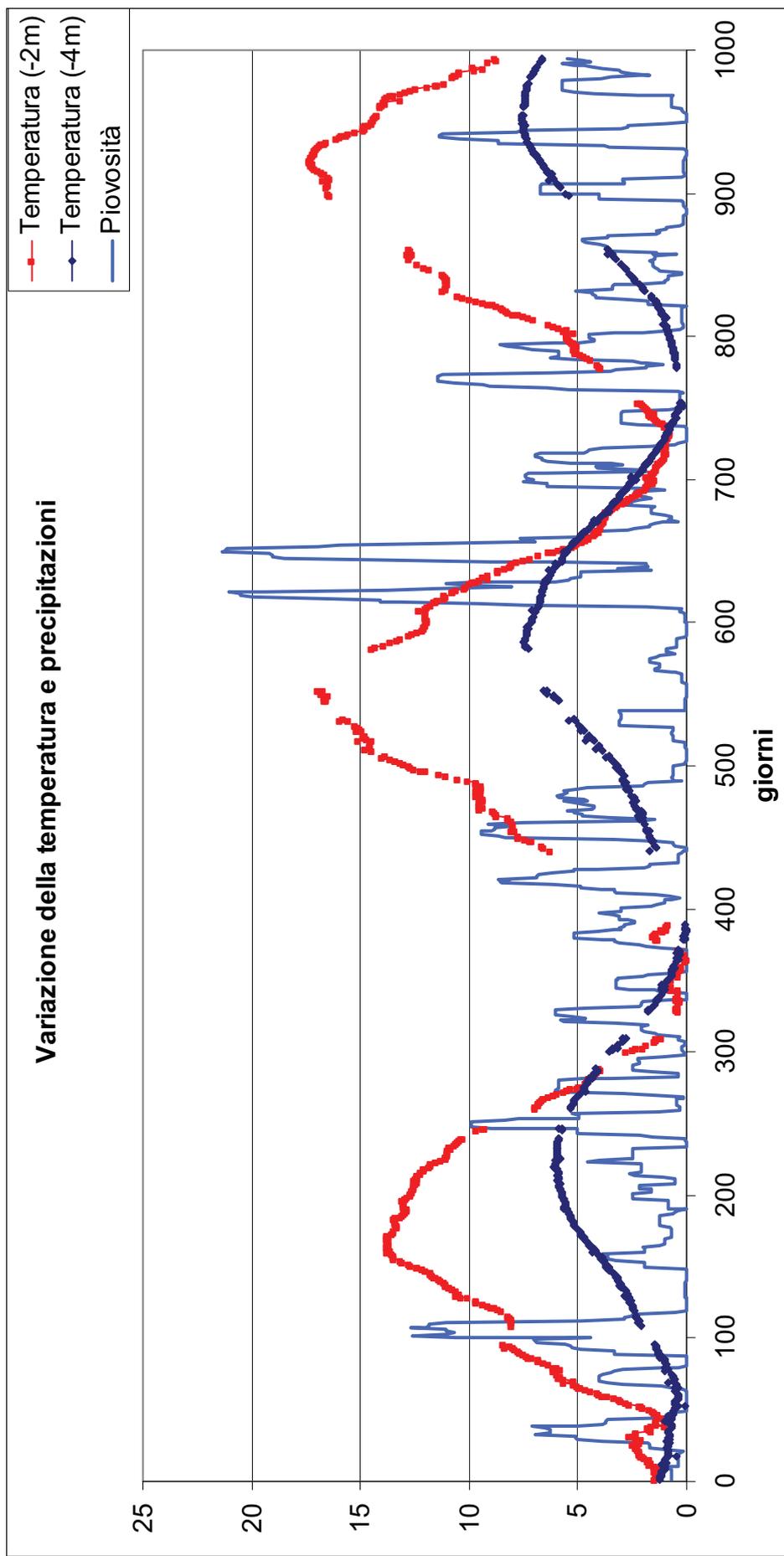


Figura 5: Grafico sommario delle variazioni di temperatura a 2 e 4 metri di profondità, per l'ago 1 e delle precipitazioni

Bibliografia

- ASTM D 4622 - 86 (1993) - Standard Test Method for Rock Mass Monitoring Using Inclinometers.
- Bendat J. S., Piersol A. G., “Random data: Analysis and measurement procedures” – New York: Wiley – 1971.
- Braccini C., Gambardella G. (a cura di), “*Elaborazione numerica dei segnali*”, 13. ed. – Milano: Franco Angeli, 2002.
- Cavazza L., Patruno A., “Terreno agrario: il comportamento fisico” - Torino – 2005.
- Cruden D.M. e Varnes D.J., 1996. Landslides Types and Processes. In: "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board. National Academy of Sciences.
- Demetrescu, C., Nitoiu, D., Boroneant, C., Marica, A., and Lucaschi, B.: Thermal signal propagation in soils in Romania: conductive and non-conductive processes, *Clim. Past*, 3, 637-645, 2007.
- Dolgikh V. V., Kirievskii E. V., “*Correction of systematic errors of ratiometric measurement transducers*” - Measurement Techniques, Vol. 45, No. 5, 2002.
- Gad-el-Hak M., “MEMS: Applications” - second edition - Taylor & Francis, 2006.
- Gad-el-Hak M., “MEMS: Design” - second edition - Taylor & Francis, 2006.

- Gad-el-Hak M., “MEMS: Introduction and fundamentals” - second edition - Taylor & Francis, 2006.
- Hutchinson J. N., 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Losanna, 10-15 July 1988, pp. 3-35.
- Kionix, 2007. AN 012: Accelerometer errors. Disponibile su: <http://www.kionix.com/sensors/application-notes.html>
- Kirkham, Don and Powers, W. L. (1972) Advanced Soil Physics, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Korvink J. G., O., Paul “*MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*”, Noyes Publications, 2005.
- Maluf N., Williams K., “*An introduction to microelectromechanical systems engineering*” - Artech House, USA 2004.
- Oppenheim A. W., Schafer R. W., “*Discrete-time signal processing*”, 2. ed., NJ: Prentice Hall, 1999.
- Panizza M. (1988). Geomorfologia Applicata. La Nuova Italia Scientifica.
- Senturia S.D., “*Microsystem Design*”, KluwerAcademic Publishers, Norwell, MA, 2001.
- SILICON LABS, C8051F353 – rev. 1.1, 5/07. Disponibile su: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F35x.pdf>

- ST-Microelectronics, 2008. LIS3L02AL datasheet. Disponibile su:
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11668/lis3l02al.htm>
- Trigila A., Iadanza C., “Statistiche nazionali ed elaborazione dati del Progetto IFFI” – APAT – Rapporti 78/2007.
- Varnes D. J., 1978. Slope movement type and processes. In: Schuster R. L., Krizek R. J. Ed., Landslides analysis and control. Transportation Research Board, Special Rept. 176, Nat. Acad. of Sciences.
- William Jury, Robert Horton, “Soil physics” - Hoboken – 2004.

Ringraziamenti

Si ringraziano: il Dott. Fabio Mantovani per la preziosa collaborazione, il Dott. Geol. Italo Di Giovanni, la Dott.ssa Francesca Pedrielli e il Dott. Alessandro Peretti per l'aiuto accordato, il Dott. Ing. Pietro Romanini, il Dott. Roberto Foddis, il Prof. Giuliano Martinelli e il suo gruppo di lavoro per aver messo a nostra disposizione una camera termostatica, il Prof. Giuliano Schffrer, il Dott. Domenico Stanzial il personale delle officine meccanica ed elettronica del Dipartimento di Fisica di Ferrara che sono stati determinanti in molte fasi di questo lavoro. Ringrazio il Prof. Mauro Gambaccini per avermi gentilmente concesso uno spazio dove lavorare in questi tre anni. Infine ringrazio tutte le persone con cui ho collaborato durante il Dottorato, dalle quali ho potuto imparare.