



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI E TARATURA STATICA DI
STRUMENTI IMPIEGATI NEL CAMPO
DELLA GEOMECCANICA E DELLA
GEOTECNICA**

**ANALYSIS AND STATIC CALIBRATION OF
INSTRUMENTS USED IN GEOMECHANICS
AND GEOTECHNICAL FIELD**

Relatore:
PROF. GIAN MARCO REVEL

Candidato:
MICHELE PALAZZI

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

INDICE

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE.....	6
SOMMARIO.....	8
ABSTRACT.....	11
CAPITOLO 1 "TARATURA STATICA E STRUMENTI DI SUPPORTO".....	14
1.1 Introduzione.....	14
1.2 Generalità sulla taratura statica.....	15
1.2.1 Analisi di regressione e metodo dei minimi quadrati.....	15
1.2.2 Finalità della taratura statica.....	16
1.2.3 Eliminazione dell'errore sistematico.....	17
1.2.4 Calcolo dell'errore casuale.....	17
1.3 Caratteristiche statiche.....	18
1.4 Generalità sugli strumenti di supporto.....	19
1.5 Programma Excel.....	20
CAPITOLO 2 "ANALISI STATICA DEI SENSORI".....	22
2.1 Introduzione.....	22
2.2 Sensori di spostamento.....	23
2.2.1 Sensori di spostamento a molla.....	24
2.2.2 Fessurimetro elettrico.....	27
2.2.3 Fessurimetro a filo.....	28
2.2.4 Barretta estensimetrica resistiva.....	31
2.2.5 Clinometro.....	33
2.3 Sensori di pressione.....	35
2.3.1 Piezometro elettrico resistivo.....	36
2.3.2 Sensore di pressione NATM.....	38

2.4	Sensori di temperatura.....	41
2.4.1	Camera climatica.....	41
2.4.2	Sensore di temperatura dell'aria.....	42
2.5	Sensori a corda vibrante.....	44
2.5.1	Barretta estensimetrica a corda vibrante.....	45
2.5.2	Altri sensori a corda vibrante.....	47
CAPITOLO 3 "VERIFICA DI SENSORI IN CAMERA CLIMATICA E ATTIVITA' ESTERNA ALL'AZIENDA".....		
3.1	Introduzione.....	51
3.1.1	Cella di carico.....	52
3.1.2	Estensimetro resistivo.....	53
3.1.3	Fessurimetro elettrico.....	54
3.1.4	Sensore di spostamento.....	55
3.2	Modifica sensori alla sorgente del fiume Potenza.....	56
CONCLUSIONI.....		59
BIBLIOGRAFIA.....		61

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di spostamento a molla</i>	26
Tabella 2 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura fessurimetro elettrico</i>	28
Tabella 3 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura fessurimetro a filo</i>	30
Tabella 4 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura barretta estensimetrica resistiva</i>	32
Tabella 5 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura clinometro</i>	35
Tabella 6 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di livello</i>	38
Tabella 7 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di pressione NATM</i>	40
Tabella 8 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di temperatura dell'aria</i>	44
Tabella 9 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura estensimetro a corda vibrante</i>	47
Tabella 10 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di spostamento a corda vibrante</i>	48
Tabella 11 <i>caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di livello a corda vibrante</i>	49
Tabella 12 <i>verifica cella di carico in camera climatica</i>	52
Tabella 13 <i>verifica estensimetro resistivo in camera climatica</i>	53
Tabella 14 <i>verifica fessurimetro elettrico in camera climatica</i>	54
Tabella 15 <i>verifica sensore di spostamento in camera climatica</i>	55

ELENCO DELLE FIGURE

<i>Figura 1</i> calibratore multifunzione.....	20
<i>Figura 2</i> centralina di lettura.....	20
<i>Figura 3</i> sensore di spostamento a molla.....	24
<i>Figura 4</i> banco di taratura sensore di spostamento a molla.....	25
<i>Figura 5</i> fessurimetro elettrico.....	27
<i>Figura 6</i> fessurimetro a filo.....	29
<i>Figura 7</i> banco di taratura fessurimetro a filo.....	30
<i>Figura 8</i> barretta estensimetrica resistiva.....	31
<i>Figura 9</i> banco di taratura barretta estensimetrica resistiva.....	32
<i>Figura 10</i> clinometro.....	33
<i>Figura 11</i> banco di taratura clinometro.....	34
<i>Figura 12</i> sensore di livello.....	36
<i>Figura 13</i> sensore di livello 12 mm.....	36
<i>Figura 14</i> banco di taratura sensore di livello.....	37
<i>Figura 15</i> sensore di pressione NATM.....	39
<i>Figura 16</i> banco di taratura sensore di pressione NATM.....	39
<i>Figura 17</i> camera climatica.....	42
<i>Figura 18</i> sensore di temperatura dell'aria.....	43
<i>Figura 19</i> banco di taratura sensore di temperatura dell'aria.....	43
<i>Figura 20</i> barretta estensimetrica a corda vibrante.....	45
<i>Figura 21</i> banco di taratura barretta estensimetrica a corda vibrante.....	46
<i>Figura 22</i> sensore di spostamento a corda vibrante.....	48
<i>Figura 23</i> sensore di livello a corda vibrante.....	48
<i>Figura 24</i> cartina geografica fiume Potenza.....	56
<i>Figura 25</i> misuratore di portata.....	57

SOMMARIO

Ai giorni d'oggi, nei paesi ad alto livello di industrializzazione, dove la competizione tra le aziende è a livello globale, la qualità dei prodotti è sicuramente l'obiettivo primario degli imprenditori e viene perseguita sempre di più attraverso il miglioramento del livello tecnologico nelle fasi di progettazione e fabbricazione.

Si tratta di un approccio alla qualità sempre più diffuso che si basa sulla ripetibilità, il controllo e la misurabilità. In questo contesto assumono sempre maggiore importanza gli strumenti di misura e, dunque, la loro precisione e affidabilità.

Per questo motivo, in ambito industriale, ci si spinge sempre più verso strumenti che abbiano caratteristiche compatibili sia con le richieste di mercato sia con le norme che riguardano il settore e necessitano di controlli, che rientrano nella taratura, per verificarne le prestazioni. La loro calibrazione rappresenta un aspetto di notevole importanza poiché permette di verificarne il corretto funzionamento e di migliorarne qualità metrologiche e materiali.

Questo tipo di approccio da parte delle aziende l'ho potuto riscontrare anche nello svolgimento del tirocinio formativo presso la Gestecno S.r.l.

Questa società, nel corso degli anni, si è affermata come azienda di riferimento nel panorama nazionale per la produzione, 100% made in Italy, di un'ampia gamma di strumentazioni per il controllo ed il monitoraggio nei settori della geomeccanica, geotecnica, idrogeologia ed ingegneria civile.

In questo elaborato viene descritta sperimentalmente la procedura di calibrazione e la taratura degli strumenti, personalmente effettuata durante il periodo del tirocinio in azienda, andando a prendere in considerazione la catena di misura, i banchi di taratura sui quali vengono posti i sensori e le procedure di analisi indicate e certificate dal SIT. La descrizione della parte pratica di calibrazione dei sensori è accompagnata dallo studio ed analisi dei dati andando a focalizzare l'attenzione sulle caratteristiche

funzionali di ogni singolo strumento tipiche del campo delle misure meccaniche, rintracciabili attraverso la procedura della taratura statica.

Sono proprio queste caratteristiche funzionali, che appartengono ad ogni strumento, il principale parametro di scelta da parte dei committenti e per questo motivo devono essere costantemente controllate, considerando anche il progredire della tecnologia, per far sì che il prodotto rimanga di elevato livello nel proprio campo di utilizzo e di misurazione.

ABSTRACT

Nowadays, in countries with high levels of industrialization, where competition between companies is global, product quality is certainly the primary objective of entrepreneurs and is being pursued more and more through the improvement of the technological level in the design and manufacturing phases.

It's an increasingly popular approach to quality that relies on repeatability, control and measurability. In this context, measuring instruments and, therefore, their accuracy and reliability are becoming increasingly important.

For this reason, in the industrial sector, we are increasingly moving towards instruments that have characteristics that are compatible with both market demands and industry standards and require controls, which are part of calibration, to verify their performance. Their calibration is an aspect of considerable importance because it allows to verify the correct functioning and to improve metrological and material qualities.

This type of approach by the companies I could also see in the course of the training internship at Gestecno S.r.l.

Over the years, this company has established itself as a reference company in the national landscape for the production, 100% made in Italy, of a wide range of instruments for control and monitoring in the fields of geomechanics, geotechnical, hydrogeology and civil engineering.

This work experimentally describes the calibration procedure of the instruments, personally carried out during the internship period in the company, going to take into account the measuring chain, the calibration benches on which the sensors are placed and the analysis procedures indicated and certified by the SIT. The description of the practical part of sensor calibration is accompanied by the study and analysis of the data going to focus attention on the functional characteristics of each individual instrument

typical of the field of mechanical measurements, traceable through the static calibration procedure.

It is precisely these functional characteristics, which belong to each instrument, the main parameter of choice on the part of the customers and for this reason they must be constantly checked, considering also the progress of the technology, to ensure that the product remains of a high level in its field of use and measurement.

CAPITOLO 1

TARATURA STATICA E STRUMENTI DI SUPPORTO

1.1 Introduzione

Prima di procedere con la descrizione e l'analisi specifica del processo di calibrazione impiegato nella pratica e degli strumenti di misura è utile introdurre i concetti fondamentali che riguardano la taratura statica, con tutte le caratteristiche che da questa si possono ricavare, e la procedura utilizzata per lo studio comune di tutta la strumentazione.

In questo ambito si applicano norme che vanno a regolare sia la procedura della taratura statica sia la stima dell'incertezza dello strumento tramite apposite formule. Gli organismi, che vanno a stilare le norme per la calibrazione, la stima dell'incertezza e il calcolo degli errori sistematici o casuali, sono solitamente di carattere nazionale (come ad esempio la UNI, ente italiano di normazione) oppure sovranazionale (ISO e CEN rispettivamente a livello mondiale e europeo).

E' stato proprio l'organismo ISO, in collaborazione con il CEN a normare ed unificare il concetto di incertezza attraverso la GUM "*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*" che nell'ottobre del 2016 è stata nuovamente modificata e aggiornata.

L'aiuto all'analisi è fornito da un'ulteriore gamma di strumenti che sono presi come riferimento poiché già tarati e certificati dal SIT (Servizio Italiano di Taratura) e dalla norma ISO9001 che ne definisce l'accuratezza e la loro incertezza di misura.

1.2 Generalità sulla taratura statica

La taratura statica è eseguita ponendo lo strumento di misura in un ambiente controllato in cui viene variato solo un ingresso in maniera quasi statica e gli altri mantenuti costanti. Questa viene effettuata misurando l'uscita del sensore e monitorando l'ingresso tramite un dispositivo con un'incertezza inferiore di almeno un ordine di grandezza rispetto a quella dello strumento da tarare. Mediante la taratura statica si determina la sensibilità statica dello strumento (o coefficiente di taratura), la linearità, l'accuratezza e la sensibilità ai disturbi.

Gli obiettivi della taratura statica sono quelli di:

- ottenere sperimentalmente le relazioni ingresso-uscita (curva di taratura)
- quantificare le prestazioni di uno strumento (calcolare il valore delle sue caratteristiche).

1.2.1 Analisi di regressione e metodo dei minimi quadrati

L'analisi di regressione serve a determinare la curva interpolante che meglio approssima una distribuzione di coppie di dati.

Il metodo dei minimi quadrati afferma che il valore più probabile di una quantità misurata è tale che la somma dei quadrati delle deviazioni delle misure da questo valore è minimo.

Se supponiamo di aver acquisito N valori di due variabili P_i e X_o e che esse sono legate da una relazione lineare: $x_o = mP_i + b$

Per la generica coppia (P_{ik}, x_{ok}) la deviazione del valore di X_{ok} calcolato usando la retta $(mP_{ik} + b)$ e il valore misurato sarà $d_k = mP_{ik} + b - x_{ok}$

Il valore più probabile di m e b, ovvero quelli che permettono di individuare la retta che meglio approssima la distribuzione delle coppie di punti sperimentali, si ottengono minimizzando la quantità:

$$\sum_{i=1}^N d_k^2 = \sum_{i=1}^N (mP_{ik} + b - x_{ok})^2$$

Per minimizzare tale funzione la sua derivata rispetto alle due incognite m e b deve essere uguagliata a 0:

$$\frac{\partial}{\partial m} \sum_{k=1}^N d_k^2 = 0 \quad e \quad \frac{\partial}{\partial b} \sum_{k=1}^N d_k^2 = 0$$

Si ottengono così due equazioni che risolte forniscono i valori di m e b.

L'analisi di regressione permette di determinare:

$$m = \frac{N \sum_i q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$$

Una volta calcolato il valore di q_o dalla retta così determinata si può calcolare il suo scostamento dal valore q_o misurato ovvero la sua varianza:

$$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2$$

E lo stesso si può fare per q_i :

$$S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2}$$

Pertanto è possibile determinare l'incertezza sulla misura dell'ingresso.

Si possono calcolare, infine, anche le varianze di m e b che permettono di identificare l'accuratezza della stima dei valori misurati mediante la retta dei minimi quadrati (incertezza di linearità):

$$S_m^2 = \frac{N S_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad S_b^2 = \frac{S_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$$

1.2.2 Finalità della taratura statica

La taratura statica permette di:

- determinare la funzione che lega l'uscita all'ingresso che è preferibile che sia lineare (retta dei minimi quadrati $q_o = m q_i + b$)
- determinare quindi i parametri della retta: m (detta *sensibilità*) e b
- determinare l'incertezza di approssimazione di tale retta rispetto ai valori misurati: S_m (*deriva di sensibilità*) e S_b (*deriva di zero*). Entrambe costituiscono l'incertezza di linearità
- determinare l'incertezza di misura: ovvero nel misurare q_i utilizzando lo strumento e la retta dei minimi quadrati che lega l'uscita all'ingresso. L'incertezza sulla misura di q_i vale:

$$s_{q_i} = \frac{s_{q_o}}{m}$$

$$s_{q_o} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (mq_i + b - q_o)^2}$$

1.2.3 Eliminazione dell'errore sistematico

- si identificano tutti gli ingressi cui è sottoposto lo strumento
- si fa variare un solo ingresso del sistema in un campo di valori costanti, tutti gli altri ingressi sono mantenuti costanti o sotto controllo statistico
- si registra l'uscita del sistema
- si ricava la legge che lega l'ingresso all'uscita $q_o = m q_i + b$ ovvero si calcolano il coefficiente angolare m e il termine noto b della retta
- si può determinare l'ingresso per qualsiasi uscita letta sullo strumento $q_i = (q_o - b)/m$.

1.2.4 Calcolo dell'errore casuale

- si calcola la dispersione dei dati intorno alla curva di taratura ovvero l'uscita sull'incertezza ($= S_{q_o}$)
- si risale all'incertezza sull'ingresso ($= S_{q_i}$)

- si sceglie un fattore di copertura ($k=1,2,3\dots$)
- si determina l'incertezza estesa di calibrazione = $\pm k \cdot S_{qi}$.

1.3 Caratteristiche statiche

Le caratteristiche statiche rappresentano il mezzo mediante il quale vengono quantificate le prestazioni di uno strumento di misura e sono fondamentali per la scelta stessa fra più alternative, considerando anche il tipo di utilizzo e il costo della strumentazione.

L'estrapolazione delle caratteristiche, insieme alla taratura degli strumenti, ha rappresentato la parte più corposa di questo studio e ha permesso di andare a confrontare e ricavare anche le piccole ma inevitabili differenze che ci sono tra campioni della stessa tipologia.

Le grandezze che sono state analizzate sono principalmente:

- CAMPO DI MISURA (anche detto *range*): rappresenta il primo criterio di scelta e dimensionamento di uno strumento e non è altro che l'intervallo che può essere misurato. In campo dinamico si usa il decibel per definirlo tramite la formula $dB=20\log(MAX/min)$ con *MAX* e *min* rispettivamente massimo e minimo del campo di misura.
- FONDO SCALA (o *portata*): è il valore massimo del campo di misura. Spesso è utilizzato per adimensionalizzare le altre caratteristiche statiche che vengono espresse in % del fondo scala (% FS)
- SOGLIA: è il più piccolo ingresso misurabile con lo strumento (anche detta *risoluzione in corrispondenza dello zero*)
- SENSIBILITA' STATICA: è la pendenza della curva di taratura che può variare da punto a punto all'interno del campo di misura
- RISOLUZIONE: è la più piccola variazione misurabile della grandezza di ingresso dello strumento
- RIPETIBILITA': è la qualità metrologica di strumenti in cui gli errori casuali o accidentali sono piccoli. Viene valutata effettuando misure ripetute in condizioni

- costanti e uguali a quelle nominali (durante la taratura). Viene espressa come deviazione standard o scarto tipo del campione di misure effettuate
- **ISTERESI**: si ha quando la curva di taratura, ottenuta per valori crescenti dell'ingresso, è diversa da quella ottenuta per valori decrescenti a causa delle irreversibilità interne allo strumento che possono essere causate da attriti meccanici o dissipazioni di energia di natura elettrica o magnetica. E' data dalla differenza massima tra la curva di carico e quella di scarico, sull'asse delle ordinate (asse dell'uscita) e in genere è dato al 50% del fondo scala
 - **LINEARITA'**: è la misura della massima deviazione dei punti di taratura dalla retta interpolante determinata col metodo dei minimi quadrati $q_0 - (m q_i + b)$
 - **ACCURATEZZA TOTALE**: è il parametro che identifica la bontà della misurazione svolta dallo strumento di misura in quanto viene calcolata come somma degli errori di linearità, isteresi, ripetibilità e risoluzione. Naturalmente più basso è il valore dell'errore di accuratezza, migliore è la misurazione che lo strumento ci presenta grazie ai bassi valori dei singoli errori sopra citati.

1.4 Generalità sugli strumenti di supporto

Come anticipato nell'introduzione, per la taratura degli strumenti mi sono servito di una strumentazione di supporto che ha reso possibile la lettura dei valori che lo strumento stesso elabora. Questo tipo di apparecchiature elettroniche deve essere naturalmente più preciso dello strumento da tarare (almeno di un ordine di grandezza), approvato e certificato dal SIT in modo da poter rendere accettabile e affidabile la riferibilità delle misurazioni.

Tra questi è importante prendere in considerazione e descrivere:

- Calibratore multifunzione MICROCAL 20 DPC (della EUROTRON INSTRUMENTS): progettato per testare e calibrare la strumentazione di processo e apparecchiature. L'unità è in grado di fornire dati che rispondono ai requisiti della norma ISO9001 per le tarature. Può essere utilizzato per misurare e generare segnali analogici e digitali spesso utilizzati in ambiente industriale.

- Centralina di lettura: multiuso e multicanale è progettata e tarata (secondo la norma ISO9001) per prendere le letture di strumenti sia elettrici che vibranti. Ha un'alta precisione (0.01% FS) e un'ampia varietà di misure.



Figura 1 - calibratore multifunzione



Figura 2 - centralina di lettura

Oltre a strumenti di tipo elettronico, come quelli precedentemente descritti, si è reso necessario l'utilizzo di veri e propri banchi di taratura e basi di appoggio per gli strumenti (anche esse tarate e collaudate) che permettono di rendere minimi sia gli errori sistematici che accidentali e più precisa la taratura.

1.5 Programma Excel

Per raccogliere i dati presi dalle misurazioni è stato utilizzato il programma Excel che permette, dato un numero idoneo di valori e di campioni analizzati, di costruire la retta interpolante (retta dei minimi quadrati) e da essa verificare di quanto i valori misurati si discostano dal valore ideale. Successivamente grazie alle giuste formule è stato possibile analizzare le caratteristiche quali la ripetibilità, la risoluzione, la linearità e l'accuratezza totale.

CAPITOLO 2

ANALISI STATICA DEI SENSORI

2.1 Introduzione

Nell'elaborato si passano ora in rassegna tutte le varie tipologie di strumenti analizzati ponendo l'attenzione sulle modalità di taratura utilizzate per ogni sensore e sulle caratteristiche di ciascuno di essi sia per quanto riguarda il funzionamento meccanico sia per le prestazioni.

Per ciascun campione sperimentalmente tarato ho utilizzato una procedura comune che permette di allineare il tipo di analisi e creare un metodo che consente di limitare al minimo gli errori causati sia dall'operatore nella misurazione, sia gli errori sistematici degli strumenti. La metodologia utilizzata nella pratica per le misurazioni è stata la seguente:

- l'analisi è avvenuta in un ambiente controllato (laboratorio aziendale a 20 °C) per limitare al minimo le possibili deformazioni causate dalla temperatura
- ciascuno strumento è stato fissato al proprio banco di taratura in modo accurato e seguendo la procedura di taratura tipica dello stesso per annullare gli effetti negativi causati dal cattivo posizionamento. La procedura di posizionamento dei campioni è descritta e certificata secondo la norma ISO9001 per ciascuno di essi
- per ciascuna gamma e tipologia di strumenti sono passati alla misurazione e alla registrazione dei valori di tre campioni uguali per verificare eventuali difformità di misurazione e imprecisioni nel montaggio e nella costruzione degli stessi. Si è inoltre resa necessaria per ogni campione una misurazione che prevede l'aumento e la diminuzione della grandezza di ingresso per andare a determinare l'errore di isteresi causato dalle irreversibilità meccaniche. La taratura di ogni campione è stata ripetuta per tre volte per andare a determinare eventuali errori di ripetibilità

- dopo aver riportato su Excel i valori misurati sono passato all'analisi vera e propria. Tramite i valori di ingresso e uscita ho costruito la retta interpolante, anche detta retta dei minimi quadrati; successivamente sono andato a calcolare gli scostamenti da essa che vanno a determinare l'errore di linearità e gli altri errori deducibili dai valori misurati come l'isteresi, la risoluzione, la ripetibilità e l'accuratezza totale
- infine sono passato al controllo delle differenze tra gli errori di campioni della stessa tipologia e ho stimato l'accuratezza totale di uno strumento fittizio che si trova nelle peggiori condizioni di misura ovvero quello che ha la somma tra i singoli errori maggiori. Il passaggio successivo è stato quello di verificare che, anche nelle peggiori condizioni, lo strumento ha un'accuratezza totale molto buona e che rientra con ampio margine nelle specifiche tecniche dichiarate nel catalogo dell'azienda.

Si passa ora alla trattazione di tutti gli strumenti analizzati suddividendoli per tipologia e funzionamento.

2.2 Sensori di spostamento

Questo tipo di sensori è utilizzato per la misura di distanze e di spostamenti sia lineari che angolari. Sono molto affidabili, precisi e con accuratezza molto elevata. Il funzionamento è di tipo meccanico-elettrico e la trasmissione del segnale avviene tramite l'interazione di un organo meccanico, come ad esempio una molla, una barretta di alluminio o un cavo di acciaio, con una bobina elettrica sulla quale viene variato il campo magnetico; ciò permette di andare ad alterare il segnale di uscita a seconda dello spostamento misurato. Necessitano di una centralina di lettura o di un calibratore per la conversione della grandezza di uscita in segnale elettrico. Il collegamento strumento-organo di lettura è sempre effettuato attraverso cavi e cablaggi certificati che permettono di rendere la misurazione più precisa, evitando dispersioni del segnale di uscita.

2.2.1 Sensore di spostamento a molla

Viene comunemente utilizzato per l'esecuzione in automatico ed in continuo delle misure di estensimetri ad aste. E' costruito completamente in acciaio inossidabile ed è dotato di opportuni raccordi per una corretta installazione sulla testa degli estensimetri. Una molla, sempre in acciaio inossidabile, permette all'asta di tornare nella posizione di riposo (considerata lo zero della misurazione) quando non è soggetta all'azione di forze esterne. In genere i cavi elettrici dei singoli trasduttori vengono cablati in un unico cavo multipolare che esce dal coperchio di protezione e raggiunge il pannello di centralizzazione o il sistema di acquisizione automatico.



Figura 3 - sensore di spostamento a molla

Il sensore di spostamento a molla risulta molto leggero, resistente e di facile utilizzo ed applicabile principalmente a:

- misure di giunti;
- misure delle deformazioni verticali dei pali durante prove di carico;
- automatizzazione delle misure di estensimetri multibase.

Il processo di taratura è stato effettuato dopo il fissaggio preliminare del sensore sul proprio banco di taratura, facendo molta attenzione a posizionarlo alla giusta altezza ed inclinazione. Successivamente ho collegato il cablaggio del sensore alla centralina di lettura sulla quale ho impostato il parametro potenziometrico che permette di tradurre un input in millimetri in un output in mV . La grandezza di input che mi ha permesso di effettuare la misurazione è rappresentata da blocchetti Johnson, naturalmente già tarati e certificati dal SIT, presi come riferimento.

A questo punto ho dato inizio alla taratura andando a variare manualmente gli spessori dei blocchetti Johnson e per ognuno ho registrato il valore in mV che appare sulla centralina. Questo procedimento va ripetuto sia in salita (aumentando gli spessori dei blocchetti) sia scendendo come spessore tenendo in considerazione che, per necessità costruttive del sensore, le misurazioni vanno all'incirca dai 1,5-55 mm. Il fatto di procedere in ambedue le direzioni mi ha permesso di andare a determinare l'isteresi dello strumento. La procedura è stata ripetuta tre volte per ogni campione, per rendere attendibile la misurazione, e per tre campioni diversi, per verificare l'esattezza dei valori.

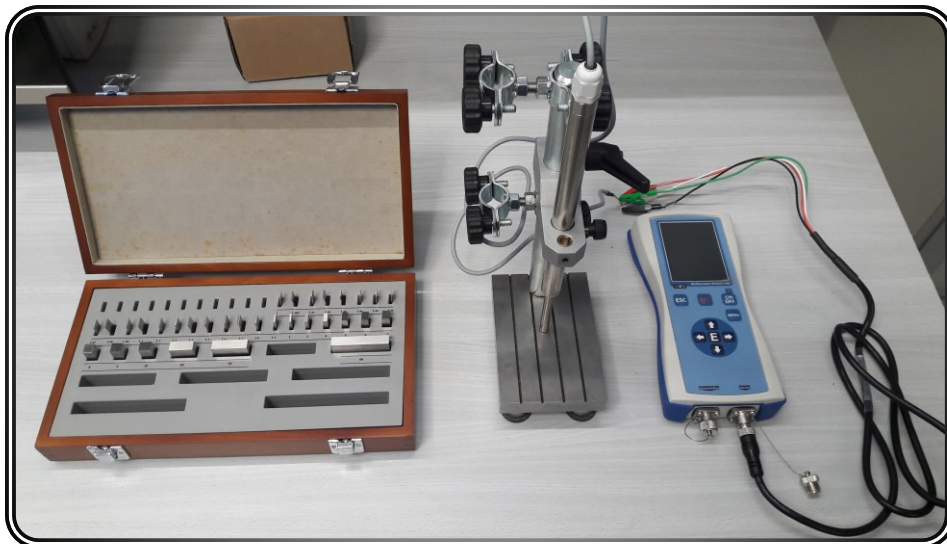


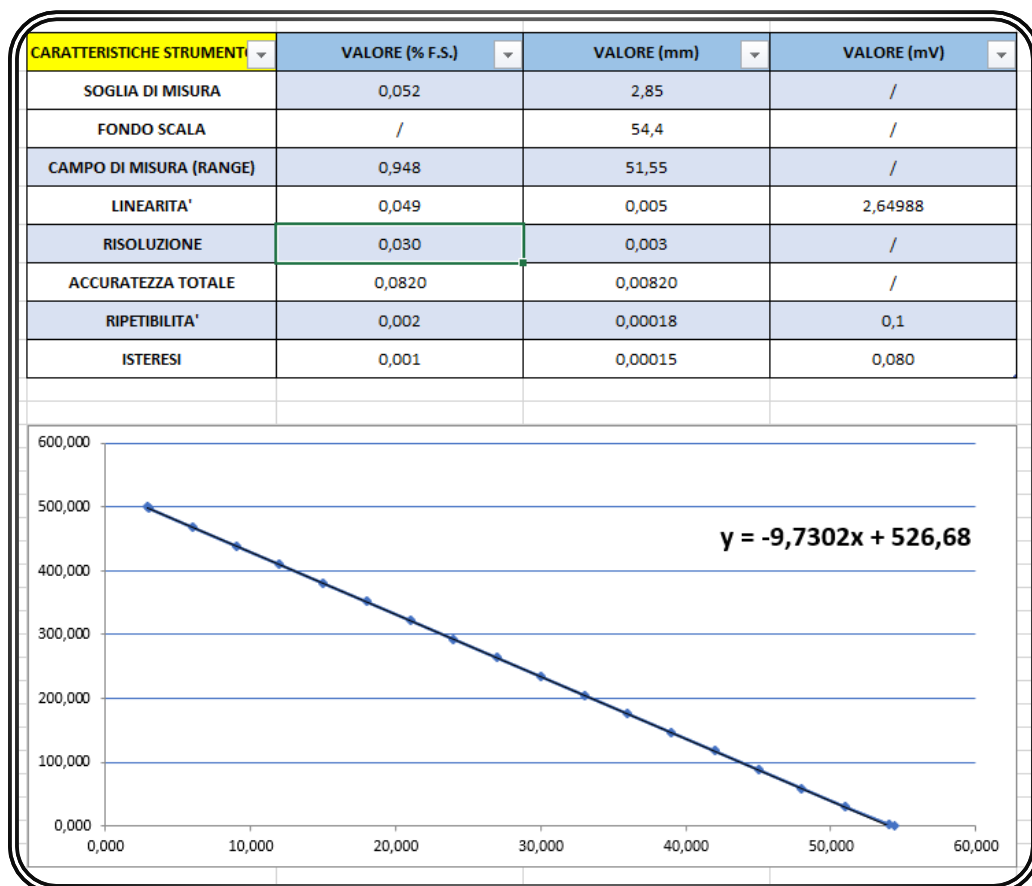
Figura 4 - banco di taratura sensore di spostamento a molla

Dopo aver raccolto i dati di ciascuno dei tre campioni analizzati su un foglio Excel sono passato alla determinazione dei valori delle caratteristiche elencate in precedenza ovvero: campo di misura, soglia, fondo scala, risoluzione, linearità, ripetibilità, isteresi e accuratezza totale.

Infine ho determinato le caratteristiche di uno strumento fittizio (che ha le caratteristiche peggiori tra i tre campioni analizzati) e lo ho confrontato con i valori catalogati per verificare di quanto i valori trovati tramite taratura fossero inferiori a quelli da catalogo.

Questo tipo di verifica è molto utile per andare a determinare eventuali imperfezioni costruttive dello strumento.

Tabella 1 - caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di spostamento a molla



2.2.2 Fessurimetro elettrico

Il fessurimetro elettrico è costituito da un sensore di spostamento di tipo potenziometrico che rileva le variazioni di posizione tra due punti posti a cavallo di una lesione o di un giunto. E' costruito completamente in alluminio, nylon ed acciaio inox ed è dotato di snodi autoallineanti per una corretta installazione anche nelle situazioni di fessurazione più difficili. Rappresenta un valido strumento per il controllo manuale o automatico delle misure di piccoli spostamenti. La lettura dei dati può avvenire mediante l'utilizzo di una centralina portatile o tramite un sistema automatico di acquisizione dati progettato per realizzare il monitoraggio in continuo.



Figura 5 - fessurimetro elettrico

Applicazioni:

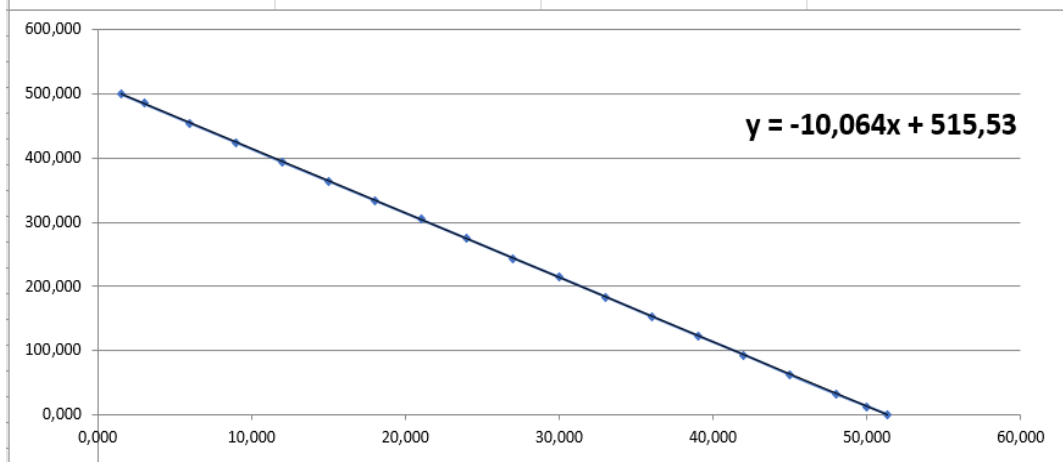
- lesioni in edifici;
- monitoraggio di fabbricati civili ed industriali;
- fratture in ammassi rocciosi;
- giunti di dighe, ponti e viadotti;
- controllo di opere di consolidamento.

Dopo aver collegato il sensore alla centralina si procede, come per il sensore di spostamento a molla, utilizzando i blocchetti Johnson (spessore) come input e leggendo il segnale in mV come output. La procedura è stata ripetuta tre volte per ogni campione per tre campioni.

La parte di registrazione dei valori su Excel e la determinazione delle caratteristiche e rette interpolanti rimane identica a quella effettuata per il sensore a molla.

Tabella 2 - caratteristiche statiche e curva di taratura fessurimetro elettrico

CARATTERISTICHE STRUMEN	VALORE (% F.S.)	VALORE (mm)	VALORE (mV)
SOGLIA DI MISURA	0,030	1,55	/
FONDO SCALA	/	51,3	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	0,970	49,75	/
LINEARITA'	0,057	0,006	2,9462
RISOLUZIONE	0,030	0,003	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,1026	0,01026	/
RIPETIBILITA'	0,0142	0,00142	0,73
ISTERESI	0,001	0,00010	0,050



2.2.3 Fessurimetro a filo

I sensori di spostamento a filo vengono utilizzati per individuare e controllare eventuali movimenti che avvengono in frane o in ammassi rocciosi instabili. Lo strumento è

essenzialmente costituito da una scatola contenente un potenziometro rotativo e un tensionatore per il cavo d'acciaio e dall'altra estremità da un ancoraggio da fissare al secondo punto di riferimento. Un cavo di acciaio viene teso con tensione costante tra i due punti di riferimento dello strumento. La lunghezza massima del cavo in acciaio può arrivare fino a 10 metri.

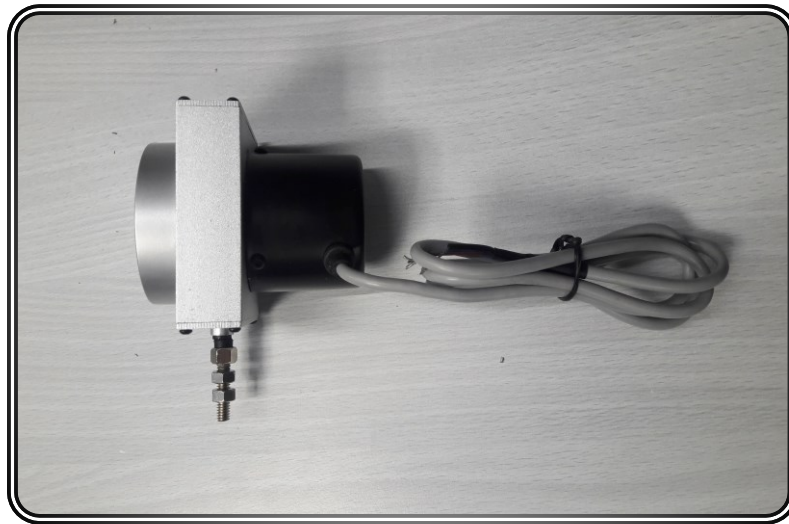


Figura 6 - fessurimetro a filo

Applicazioni:

- monitoraggio di giunti e fessure di grandi dimensioni;
- collaudo di solai e coperture;
- monitoraggio di movimenti franosi superficiali;
- misure di convergenza.

Per la taratura del fessurimetro a filo ho utilizzato un banco di taratura universale e certificato costituito da: supporti per fissare lo strumento di misura (due punti di fissaggio, mobile e fisso), calibro digitale per misurare gli spostamenti, vite senza fine collegata ad una manopola per andare a spostare la piastra che rappresenta il punto mobile di fissaggio dello strumento.

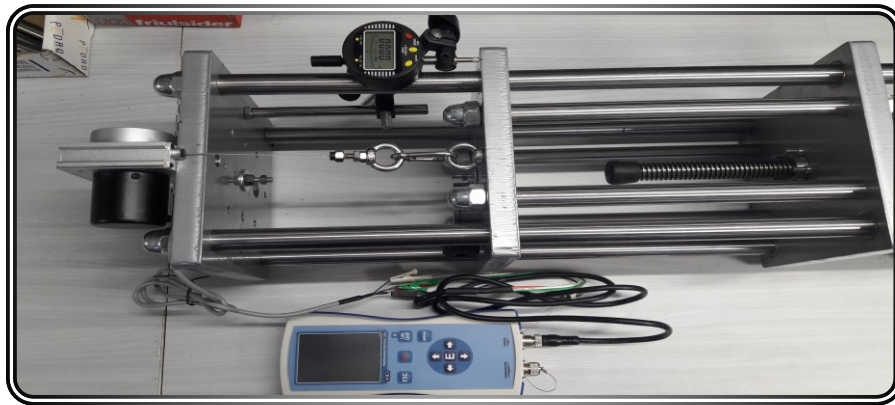
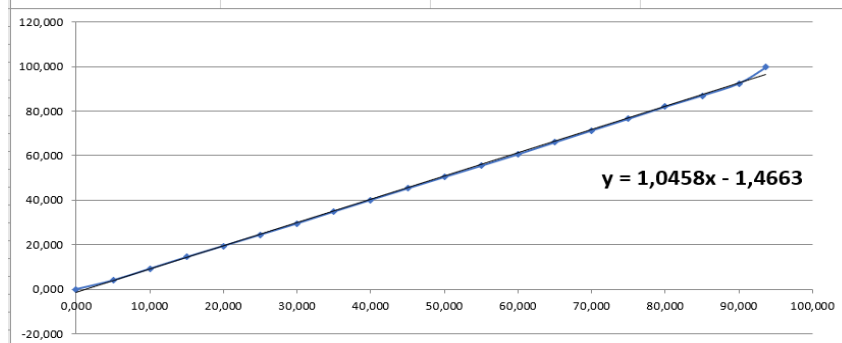


Figura 7 - banco di taratura fessurimetro a filo

Dopo aver fissato il fessurimetro al banco di taratura sono passato alla taratura. Girando la manovella e simultaneamente la vite senza fine, la piastra mobile si allontana dal sensore così da permettere al filo di acciaio di distendersi. La distanza tra la piastra fissa e quella mobile (che rappresenta la lunghezza del filo) è misurata dal calibro digitale e la centralina di lettura, collegata al sensore, permette di trasformare questa lunghezza in mm (grandezza di input) direttamente in segnale elettrico.

Tabella 3 - caratteristiche statiche e curva di taratura fessurimetro a filo

CARATTERISTICHE STRUMENT	VALORE (% F.S.)	VALORE (mm)
SOGLIA DI MISURA	/	0,00
FONDO SCALA	/	93,70
CAMPO DI MISURA (RANGE)	1,000	93,70
LINEARITA'	0,323	0,032
RISOLUZIONE	infinita	infinita
ACCURATEZZA TOTALE	0,6475	0,06475
RIPETIBILITA'	0,2620	0,02620
ISTERESI	0,062	0,00620



2.2.4 Barretta estensimetrica resistiva

Le barrette estensimetriche sono utilizzate per misurare gli stati tensionali esistenti in strutture portanti o per monitorare le tensioni esistenti durante le fasi di scavo delle gallerie. I sensori sono installati al centro della barretta secondo una particolare disposizione che consente la compensazione del segnale elettrico dagli effetti termici e di flessione. La barretta può lavorare indifferentemente sia a trazione che a compressione, inoltre la parte sensibile è resinata al fine di preservare la funzionalità in caso di urti od immersione. La barretta è a tenuta stagna, può essere applicata esternamente a strutture sollecitate oppure annegata in getti di calcestruzzo per le misure delle sollecitazioni.



Figura 8 - barretta estensimetrica resistiva

Dopo aver fissato la barretta al banco di taratura tramite viti M6 si procede alla taratura.

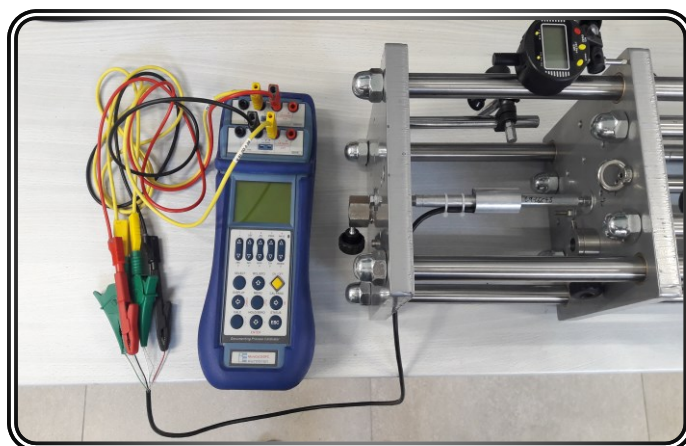
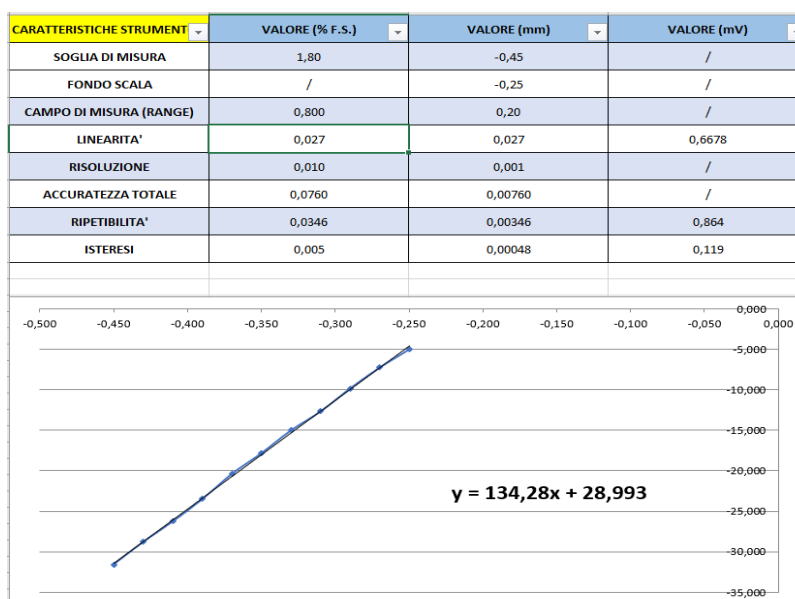


Figura 9 - banco di taratura barretta estensimetrica resistiva

Girando la manovella e simultaneamente la vite senza fine, la piastra mobile si allontana permettendo alla barretta di allungarsi in modo quasi impercettibile rispetto alla posizione di riposo. L'allungamento della barretta arriva fino ad un massimo di 0,2 mm (per questo è molto sensibile) ed è misurato dal calibro digitale mentre il calibratore, collegato al sensore, permette di trasformare questa lunghezza in mm (grandezza di input) direttamente in segnale elettrico (mV). La procedura viene ripetuta sia in trazione che in compressione e si confrontano i valori.

Tabella 4 - caratteristiche statiche e curva di taratura barretta estensimetrica resistiva



2.2.5 Clinometro

I clinometri di superficie vengono utilizzati per monitorare cambiamenti nell'inclinazione di strutture, pareti, muri di contenimento, ammassi rocciosi e valutare il comportamento di ponti o travi caricate. Sono dotati di un sensore di tipo MEMS biassiale.

Questo strumento rileva le variazioni angolari delle strutture fornendo utili indicazioni riguardanti i movimenti rotazionali delle stesse. Può essere anche installato all'interno di aste che vengono poste nel terreno per verificare se ci sia rischio di frane e smottamenti.



Figura 10 - clinometro

Applicazioni:

- monitoraggi di strutture in calcestruzzo, travi e colonne;
- edifici storici;
- muri di contenimento;
- cedimenti del terreno;
- monitoraggio di strutture in acciaio;
- dighe in calcestruzzo;
- torri eoliche;
- monitoraggio di frane.

Per la taratura del clinometro ho utilizzato un banco di taratura certificato dal SIT grazie al quale si è eseguita la misura. Il banco di taratura comprende un supporto sul quale va fissata la scatola del clinometro attraverso viti M6 e un tubo in acciaio inox (collegato al supporto stesso) che può essere inclinato secondo angoli che vanno da 0 a 28 gradi, sufficienti visto che il clinometro stesso ha un campo di misura che va da -10 a +10 °.

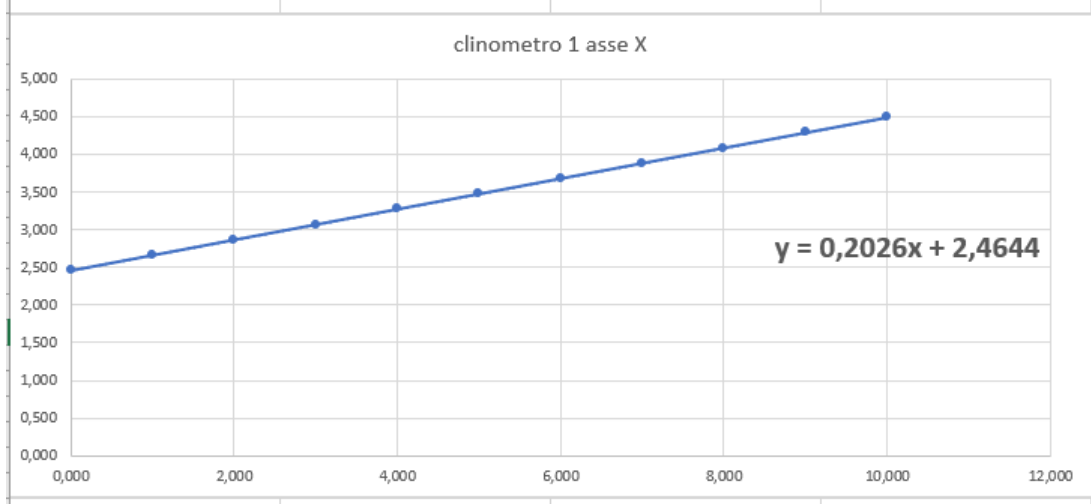


Figura 11 - banco di taratura clinometro

Eseguito il fissaggio sul supporto sono passato al collegamento dei cavi alla centralina di lettura ed ho scelto il parametro Voltmetrico che permette di leggere un input in gradi (°) e trasformarlo in un output in Volt. Per la taratura ho seguito la solita procedura, partendo da 0 ° ed arrivando fino a 10 ° per poi scendere nuovamente per rintracciare eventuali errori legati all'isteresi. Si è ripetuta la misurazione per tre volte per ogni campione (per tre campioni) ma si è reso necessario effettuare la taratura secondo due direzioni (asse X e Y) essendo il clinometro biassiale. I dati raccolti sono stati riportati in Excel e ricavate le caratteristiche aggiungendo l'errore di offset (dovuto al posizionamento dello zero dello strumento di misura).

Tabella 5 - caratteristiche statiche e curva di taratura clinometro

CARATTERISTICHE STRUMENT	VALORE (% F.S.)	VALORE (°)	VALORE (V)
SOGLIA DI MISURA	/	0	/
FONDO SCALA	/	10	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	1,000	10	/
LINEARITA'	0,024	0,0024	0,0024
RISOLUZIONE	0,030	0,003	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,0840	0,00840	/
RIPETIBILITA'	0,0200	0,00200	0,002
ISTERESI	0,010	0,00100	0,001
ERRORE DI OFFSET	/	0,17572	/



2.3 Sensori di pressione

I sensori di pressione analizzati sono piccoli dispositivi elettrici che solitamente vengono collegati a vere e proprie apparecchiature di pressione come ad esempio martinetti idraulici o celle di carico. Mediante un fluido che viene messo in pressione all'interno di questi, il sensore di pressione trasduce il segnale di input (in pressione appunto) e lo trasforma in segnale elettrico. Esistono anche sensori che vengono immersi in acqua come in pozzi o bacini idrici e che permettono, tramite la misurazione della pressione ad una certa profondità, di risalire alla colonna d'acqua posta al di sopra di essi.

Per effettuare le misurazioni su questo tipo di strumento si rende necessario l'utilizzo di un dispositivo di supporto che permette di fornire e leggere una pressione in kPa . Questo è dotato di una pompa ad azione manuale che permette di fornire pressione allo strumento che viene collocato nell'apposito supporto.

2.3.1 Piezometro elettrico resistivo

Il piezometro elettrico resistivo è un trasduttore di pressione che viene utilizzato per misurare la pressione interstiziale nel terreno oppure per determinare l'altezza piezometrica all'interno di piezometri. In questa ultima versione un tubicino mette in comunicazione la camera di riferimento del sensore con l'atmosfera, in modo tale che eventuali variazioni di pressione ambientale agiscano contemporaneamente sia sulla superficie piezometrica che sulla camera di riferimento. Ciò permette di misurare la sola pressione piezometrica e quindi il livello dell'acqua. Il cavo elettrico di collegamento, essendo autoportante, viene fissato alla carcassa del piezometro permettendo l'immissione ed il recupero senza problemi. Esistono anche sensori miniaturizzati da 12 mm.



Figura 12 - sensore di livello



Figura 13 - sensore di livello 12 mm

Applicazioni:

- misura della pressione interstiziale;
- misura del livello d'acqua in piezometri;
- misura del livello dell'acqua in pozzi, serbatoi e cisterne;
- misura del livello dell'acqua in canali, fiumi e laghi.

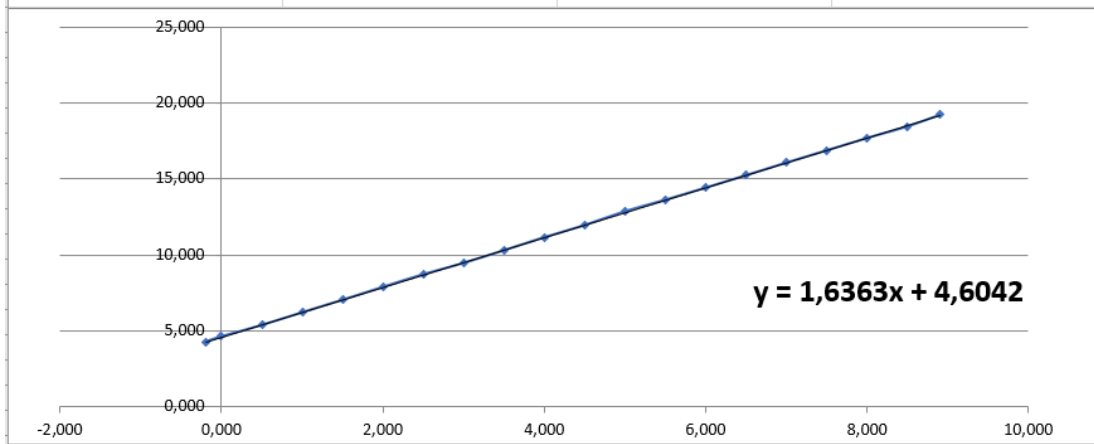


Figura 14 - banco di taratura sensore di livello

Dopo aver fissato il sensore nel supporto e collegato i cavi alla centralina di lettura, impostata con il parametro amperometrico (trasforma la pressione in kPa in intensità di corrente in mA) si inizia la taratura. Imprimendo pressioni man mano sempre più alte si registrano i valori in Excel e si determinano le caratteristiche sia aumentando che diminuendo la pressione. Il processo è stato ripetuto per più tipi di sensori con lo stesso funzionamento, in particolare sono da: 1 m (pressioni da 0 a 10 kPa), 10 m (pressioni da 0 a 100 kPa), 100 m (pressioni da 0 a 1000 kPa), sensore 12 mm miniaturizzato (pressioni da 0 a 200 kPa).

Tabella 6 - caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di livello

CARATTERISTICHE STRUMENTI	VALORE (% F.S.)	VALORE (KPa)	VALORE (mA)
SOGLIA DI MISURA	0,022	-0,2	/
FONDO SCALA	/	8,9	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	1,022	9,1	/
LINEARITA'	0,103	0,010	0,09195
RISOLUZIONE	0,010	0,001	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,9594	0,09594	/
RIPETIBILITA'	0,1551	0,01551	0,138
ISTERESI	0,691	0,06910	0,615



2.3.2 Sensore di pressione NATM

Il sensore di pressione NATM è un piccolo componente che viene messo all'interno delle celle di pressione. Queste vengono utilizzate per il controllo delle pressioni agenti al contatto tra una opera di sostegno e un terreno che spinge. La cella è costituita da un polmone d'acciaio di forma rettangolare riempito da un olio speciale e collegato ad un trasduttore elettrico che trasforma ogni variazione di pressione agente sul polmone in una variazione di segnale elettrico con uscita standard 4-20 mA.



Figura 15 - sensore di pressione NATM

Applicazioni:

- misura delle pressioni in muratura e fondamenta;
- monitoraggio della spinta del terreno in muri di contenimento, rivestimenti di gallerie;
- misura delle pressioni in rocce e terreni;
- diaframmi e dighe;
- controlli sia in fase di costruzione che di esercizio.

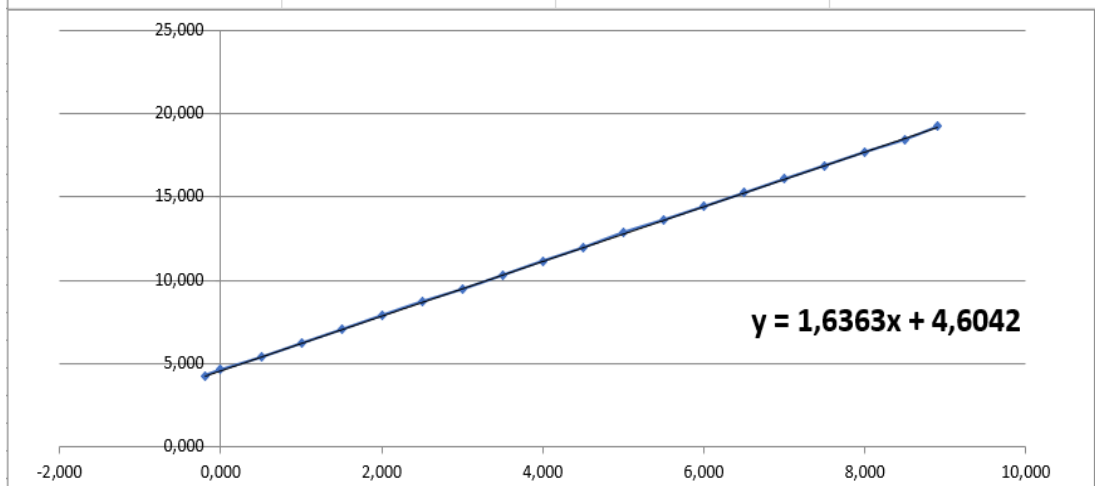


Figura 16 - banco di taratura sensore di pressione NATM

Dopo aver fissato il sensore nel supporto e collegato i cavi alla centralina di lettura, impostata con il parametro amperometrico (trasforma la pressione in *kPa* in intensità di corrente in *mA*), ho iniziato la taratura. Imprimendo pressioni man mano sempre più alte, ho registrato i valori in Excel e determinato le caratteristiche sia aumentando che diminuendo la pressione.

Tabella 7 - caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di pressione NATM

CARATTERISTICHE STRUMENTI	VALORE (% F.S.)	VALORE (KPa)	VALORE (mA)
SOGLIA DI MISURA	0,022	-0,2	/
FONDO SCALA	/	8,9	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	1,022	9,1	/
LINEARITA'	0,103	0,010	0,09195
RISOLUZIONE	0,010	0,001	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,9594	0,09594	/
RIPETIBILITA'	0,1551	0,01551	0,138
ISTERESI	0,691	0,06910	0,615



2.4 Sensori di temperatura

I sensori di temperatura costituiscono una parte a se stante della sensoristica analizzata in quanto sono strumenti che raramente vengono utilizzati in modo indipendente (come ad esempio per la misura della temperatura di un ambiente) ma spesso si ritrovano accoppiati a macchinari che nelle lavorazioni sono sottoposti a grandi variazioni di temperatura. Sono fondamentali per il controllo ed entrano in gioco per questioni di sicurezza quando si arriva a temperature operative troppo basse o elevate. Anche la loro taratura risulta molto difficile in quanto bisogna ricreare forti escursioni termiche per andare a descrivere il loro comportamento in tutto il campo di misura. Sono caratterizzati dall'essere molto precisi, tanto da misurare piccole variazioni, ma possono subentrare problemi nelle misurazioni per temperature estreme a causa della dilatazione dei materiali e delle resine polimeriche da cui è composto.

2.4.1 Camera climatica

La camera climatica è uno strumento di enorme valore grazie al quale è stato possibile tarare i sensori di temperatura. E' un involucro di acciaio inossidabile e alluminio a tenuta stagna (non permette l'entrata e la fuoriuscita di calore) che può essere programmato, tramite uno schermo predisposto, secondo i valori di temperatura e umidità desiderati. Le variazioni di temperatura vengono raggiunte in breve tempo e nel nostro caso siamo passati da -20 °C a 80 °C. I sensori vengono posti al suo interno e un'apertura laterale (anch'essa a tenuta stagna) permette il passaggio di cavi e cablaggi da collegare poi alla centralina.

Il suo funzionamento è di tipo elettrico e necessita di una riserva di acqua dechlorata per l'umidificazione e la deumidificazione dell'aria al suo interno.



Figura 17 - camera climatica

2.4.2 Sensore di temperatura dell'aria

La misura della temperatura dell'aria viene effettuata per controllare fenomeni con forti escursioni termiche, quali il ciclo giorno/notte su strutture o per compensare gli errori termici di alcuni strumenti. L'elemento sensibile (termoresistenza al platino) è protetto da un contenitore in materiale plastico antiurto. Se utilizzato all'esterno deve essere montato preferibilmente sul lato nord o in una posizione riparata, mentre in caso di esposizione diretta ai raggi solari occorre usare una protezione.



Figura 18 - sensore di temperatura dell'aria

Dopo aver posizionato i sensori all'interno della camera climatica ho fatto passare i relativi cavi nel foro posto sulla destra della camera e collegato alla centralina di lettura impostando come parametro la temperatura. La centralina ci permette di trasformare la temperatura in °C letta dal sensore in un'uscita in mA.

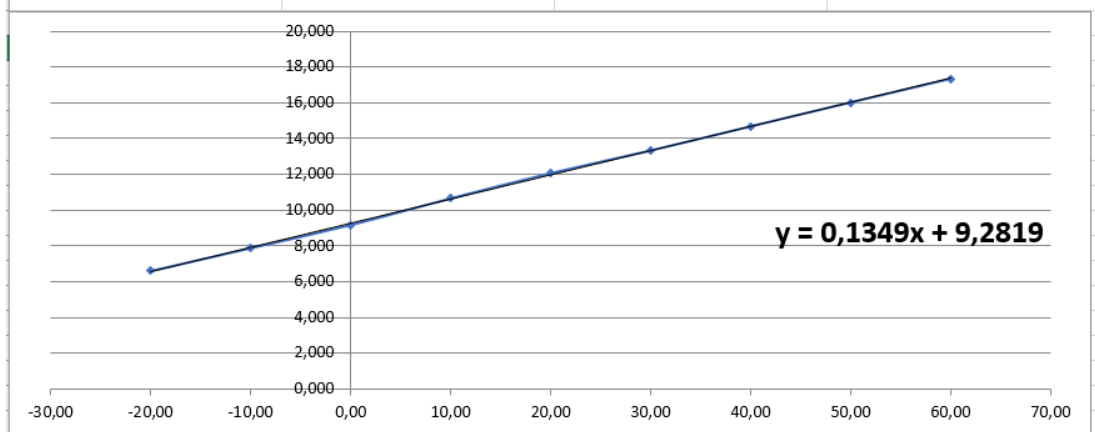


Figura 19 - banco di taratura sensore di temperatura dell'aria

Chiusa la camera climatica ho impostato la temperatura sullo schermo, disattivando il parametro dell'umidità (perché non viene letto dallo strumento), e per ogni variazione di 10 °C ho annotato il valore sulla centralina. Si procede effettuando la misura per tre volte per ognuno dei tre sensori.

Tabella 8 - caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di temperatura dell'aria

CARATTERISTICHE STRUMENTO	VALORE (% F.S.)	VALORE (°C)	VALORE (mA)
SOGLIA DI MISURA	-0,333	-20	/
FONDO SCALA	/	60	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	1,333	80	/
LINEARITA'	0,004	0,037	0,2211
RISOLUZIONE	0,00002	0,01	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,0054	0,05402	/
RIPETIBILITA'	0,0016	0,01600	0,096
ISTERESI	0,00010	0,00100	0,006



2.5 Sensori a corda vibrante

I sensori che verranno analizzati sono caratterizzati dall'aver al loro interno una corda finissima in acciaio che, quando viene sollecitata sia in trazione che in compressione, grazie all'impulso elettrico di una bobina a contatto con la superficie del sensore, inizia a vibrare con una frequenza proporzionale all'allungamento applicato. I sensori infatti se sono sollecitati in trazione avranno una frequenza maggiore; sarà il contrario se

sollecitati in compressione. Lo strumento che ci permette di leggere questa frequenza è sempre la centralina di lettura che questa volta viene collegata al sensore attraverso un particolare cavo con all'estremità proprio la bobina (ricoperta di resina).

Questi sensori permettono di effettuare misure molto precise con pochissimi margini di errore anche se il montaggio e la costruzione stessa dello strumento risulta molto difficile poiché la corda in acciaio deve essere posta alla giusta tensione per far arrivare il segnale alla centralina di lettura.

2.5.1 Barretta estensimetrica a corda vibrante

Viene utilizzata per misurare gli stati tensionali esistenti in strutture portanti o per monitorare le tensioni esistenti durante le fasi di scavo delle gallerie.

Le barrette estensimetriche a corda vibrante consistono in un tubetto in acciaio inox all'interno del quale una sottile corda, fissata alle due estremità, è fatta vibrare da una bobina di eccitazione. All'interno un termistore provvede a rilevare la temperatura. La barretta può lavorare sia in trazione che in compressione, inoltre è a tenuta stagna e può essere applicata esternamente a strutture metalliche sollecitate oppure annegata in getti di calcestruzzo per le misure di sollecitazioni.



Figura 20 - barretta estensimetrica a corda vibrante

Applicazioni:

- pali e prove su pali;
- strutture in calcestruzzo, travi e colonne;
- fondamenta e diaframmi;
- gallerie;
- strutture in acciaio, tubi;
- dighe;
- ponti e viadotti.

Dopo aver fissato la barretta al banco di taratura tramite viti M6 si procede alla taratura.

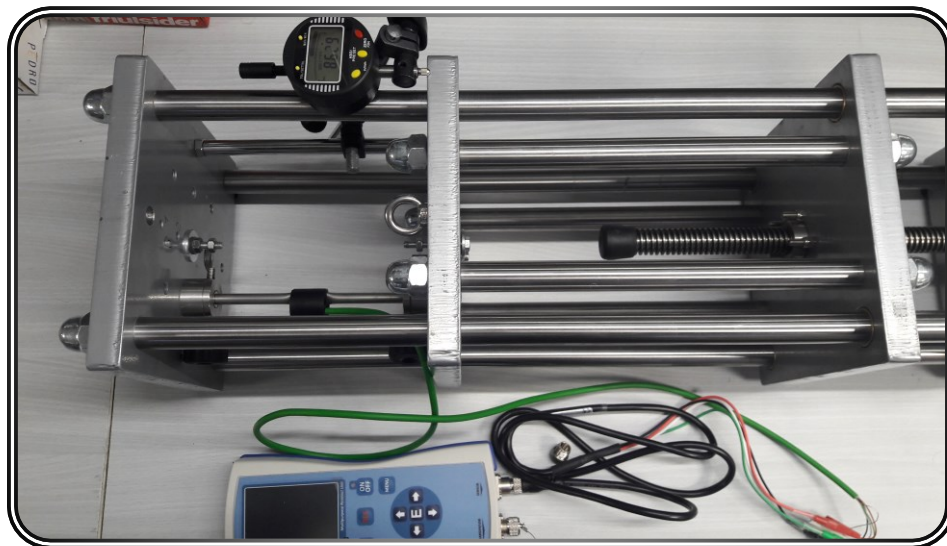
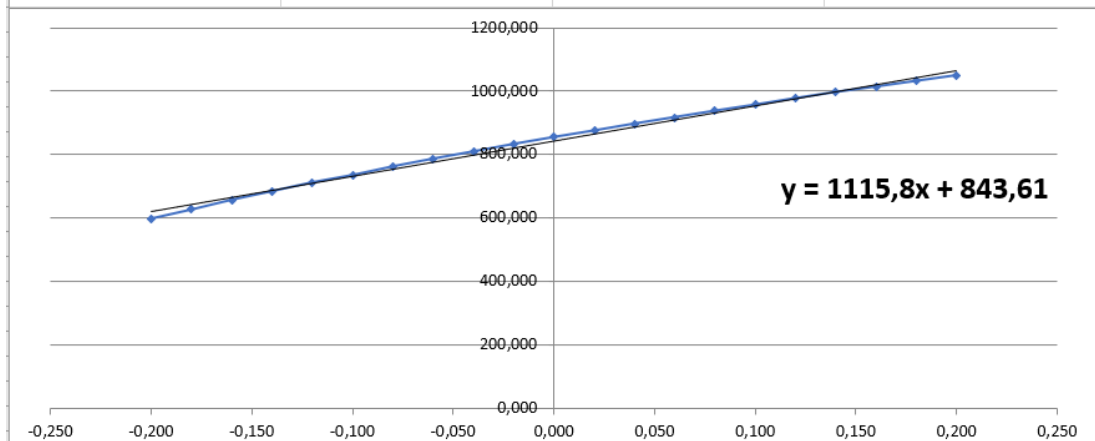


Figura 21 - banco di taratura barretta estensimetrica a corda vibrante

Girando la manovella e simultaneamente la vite senza fine, la piastra mobile si allontana permettendo alla barretta di allungarsi in modo quasi impercettibile rispetto alla posizione di riposo. L'allungamento della barretta arriva fino ad un massimo di 0,4 mm (per questo è molto sensibile) ed è misurato dal calibro digitale mentre la centralina di lettura, collegata al sensore attraverso la bobina di eccitazione, permette di trasformare l'allungamento in mm (grandezza di input) direttamente in segnale in frequenza (Hz). La procedura viene ripetuta sia in trazione che in compressione e si confrontano i valori.

Tabella 9 - caratteristiche statiche e curva di taratura estensimetro a corda vibrante

CARATTERISTICHE STRUMEN	VALORE (% F.S.)	VALORE (mm)	VALORE (Hz)
SOGLIA DI MISURA	1,000	-0,200	/
FONDO SCALA	/	0,200	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	2,000	0,400	/
LINEARITA'	0,114	0,011	22,75
RISOLUZIONE	0,0100	0,001	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,1453	0,01453	/
RIPETIBILITA'	0,0170	0,00170	3,4
ISTERESI	0,004	0,00045	0,900



2.5.2 Altri sensori a corda vibrante

I prossimi due sensori hanno lo stesso identico funzionamento dei sensori non a corda analizzati in precedenza (sensore di spostamento, sensore di livello o piezometro elettrico resistivo).

La sostituzione dei componenti all'interno, che garantiva un'uscita in termini di corrente, con la corda vibrante (uscita in frequenza), permette allo strumento di essere più preciso e più facile da utilizzare in campo pratico. Garantisce una migliore risoluzione ed un'accuratezza totale nettamente inferiore rispetto agli altri sensori.



Figura 22 – sensore di spostamento a corda vibrante



Figura 23 - sensore di livello a corda vibrante

Tabella 10 - caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di spostamento a corda vibrante

CARATTERISTICHE STRUMENT	VALORE (% F.S.)	VALORE (mm)	VALORE (Hz)
SOGLIA DI MISURA	/	0,000	/
FONDO SCALA	/	50,000	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	1,000	50,000	/
LINEARITA'	0,263	0,026	13,17
RISOLUZIONE	0,010	0,001	0,001
ACCURATEZZA TOTALE	0,0512	0,00512	/
RIPETIBILITA'	0,0272	0,00272	13,6
ISTERESI	0,014	0,00140	7,000

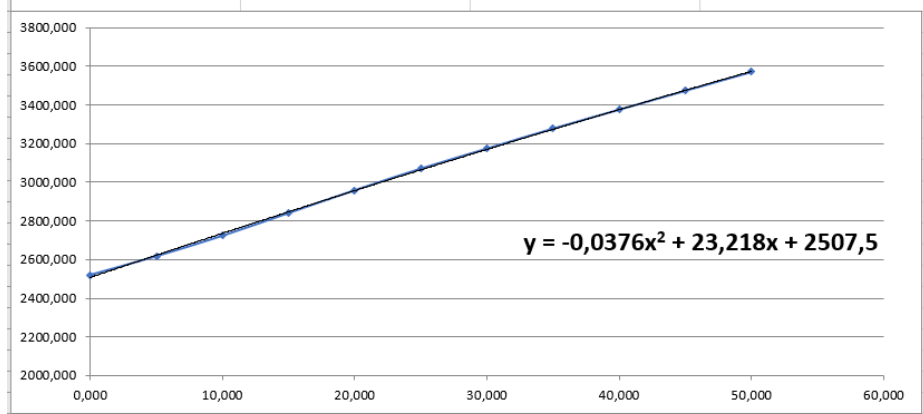
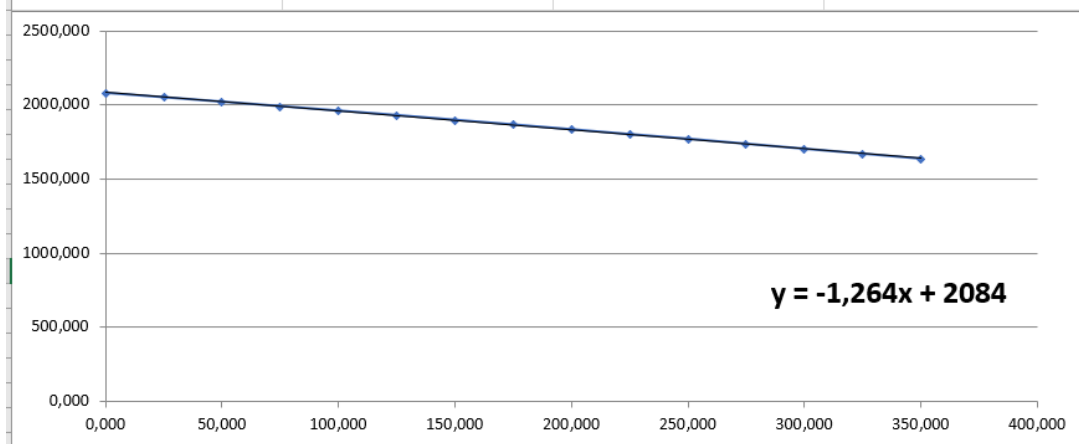


Tabella 11 - caratteristiche statiche e curva di taratura sensore di livello a corda vibrante

CARATTERISTICHE STRUMENTI	VALORE (% F.S.)	VALORE (KPa)	VALORE (Hz)
SOGLIA DI MISURA	0,00057	0,200	/
FONDO SCALA	/	350,000	/
CAMPO DI MISURA (RANGE)	0,999	349,8	/
LINEARITA'	0,0186	0,00186	6,51951
RISOLUZIONE	0,00029	0,1	/
ACCURATEZZA TOTALE	0,0303	0,00303	/
RIPETIBILITA'	0,0077	0,00077	2,7
ISTERESI	0,004	0,00037	1,300



CAPITOLO 3

VERIFICA DEI SENSORI IN CAMERA CLIMATICA E ATTIVITA' ESTERNA ALL'AZIENDA

3.1 Introduzione

Dopo aver effettuato la taratura della strumentazione, il controllo prosegue con la verifica dei sensori nella camera climatica. Ciò vuol dire che, ponendo diversi sensori all'interno della camera in posizione di riposo (senza sollecitazioni), variando la temperatura da -20 °C a 50 °C , ci si rende conto che il valore letto sulla centralina varia.

Questo accade poiché, in un delta T di temperatura di 70 °C , le deformazioni dei materiali e quelle interne di ogni sensore fanno sì che lo strumento non possa misurare lo stesso valore.

In particolare ciò accade poiché ciascuno strumento, o per meglio dire la maggior parte di loro, ha un range di temperature di utilizzo descritto anche nei cataloghi.

La verifica ha particolarmente senso dal punto di vista del processo di miglioramento tecnologico poiché si cercano di aumentare le prestazioni soprattutto migliorando i materiali di cui sono fatti i sensori.

Dal punto di vista grafico, grazie al Excel, si dovrebbero ottenere curve con andamento il più possibile lineare ma come si potrà notare questo non accade per gli strumenti che dipendono fortemente dalle condizioni ambientali.

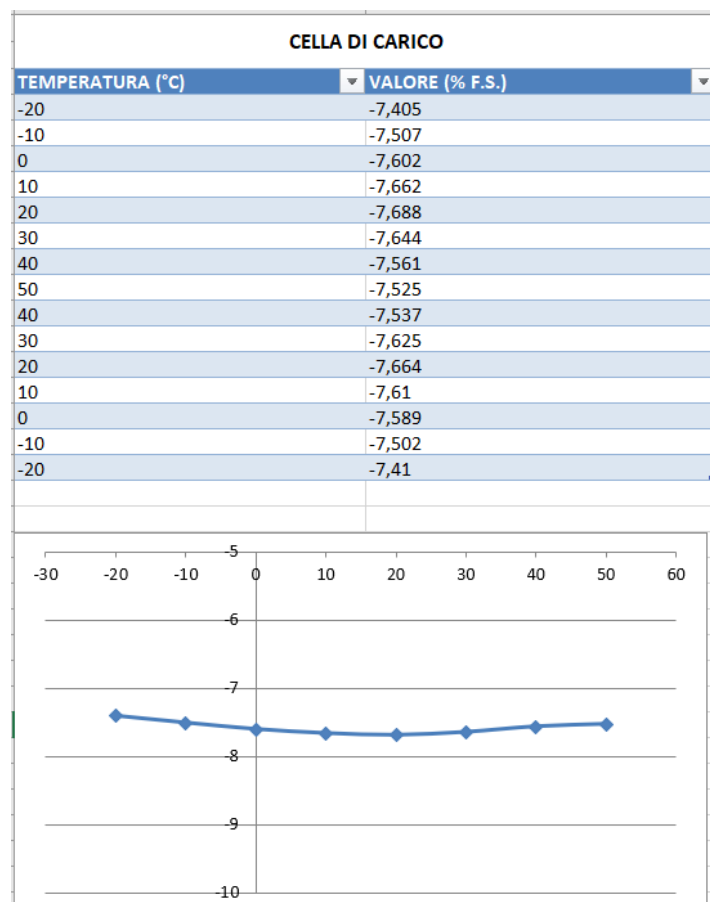
Passiamo in rassegna solo alcuni dei sensori, ovvero quelli che hanno un comportamento di particolare interesse dal punto di vista meccanico ed ingegneristico.

3.1.1 Cella di carico

La cella di carico non è stata precedentemente analizzata poiché presuppone controlli che prevedono l'utilizzo di presse idrauliche che imprimono elevatissime pressioni e sul quale effettuare una taratura precisa ed affidabile risulta molto difficile.

Per quanto riguarda questa seconda tipologia di analisi, invece, si può notare dalla tabella e grafico seguente che, al variare della temperatura, i valori misurati cambiano veramente di poco. Ciò dipende dalle caratteristiche dello strumento che, essendo costruito completamente in acciaio inox di notevole resistenza e con guarnizioni che non permettono la fuoriuscita di olio dall'interno, per variazioni di temperatura contenute, come in questo caso, misura costantemente lo stesso valore.

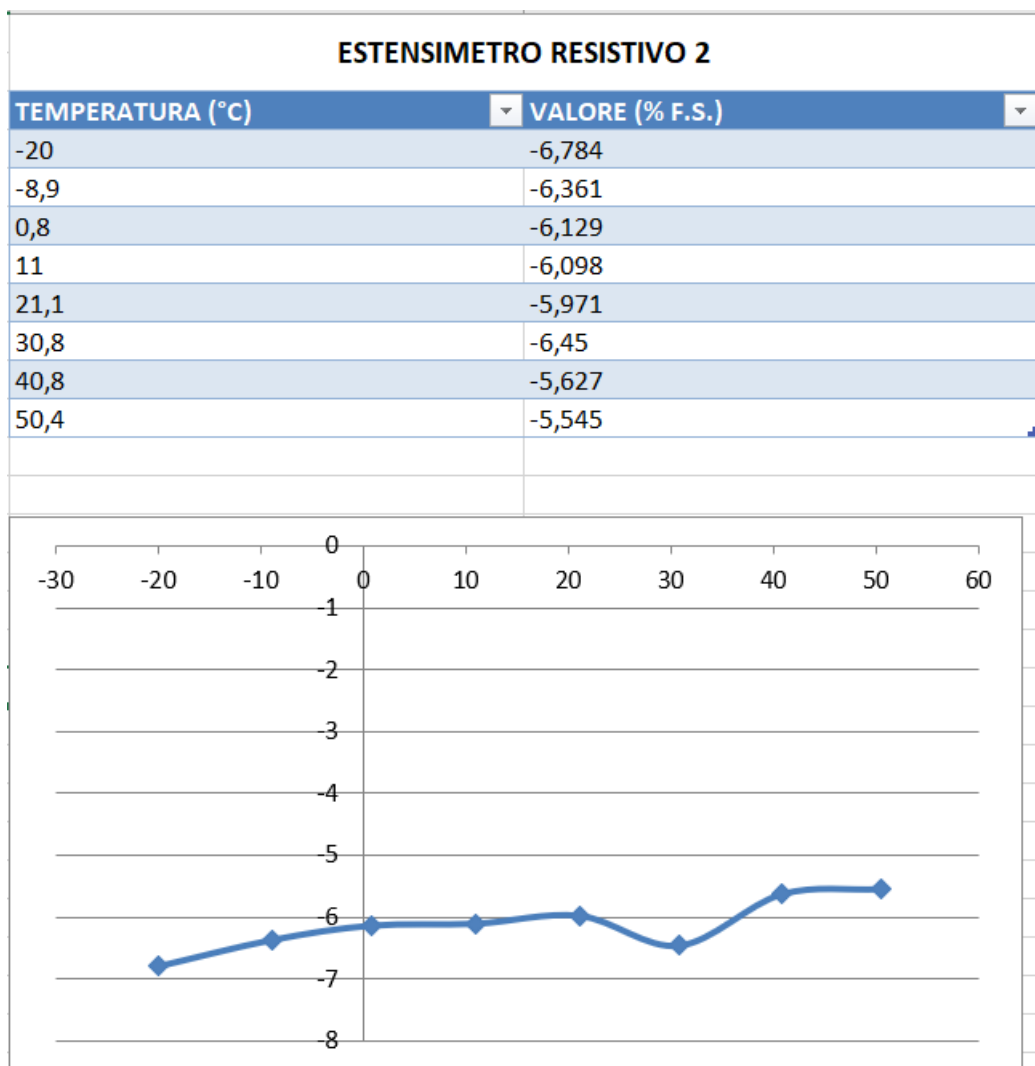
Tabella 12 - verifica cella di carico in camera climatica



3.1.2 Estensimetro resistivo

Comportamento notevolmente diverso è quello dell'estensimetro resistivo. La sua struttura, che presuppone comunque la presenza di acciaio, poco soggetto a deformazione a queste temperature, si compone anche di una particolare resina (di consistenza pastosa) che risulta necessaria per la trasmissione del segnale tra organo meccanico e parte elettrica (bobina), ma purtroppo molto soggetta a variazioni di temperatura. Il comportamento infatti non è assolutamente lineare in quanto la resina tende a solidificare a temperature intorno ai -10 °C e a diventare liquida dopo i 40 °C.

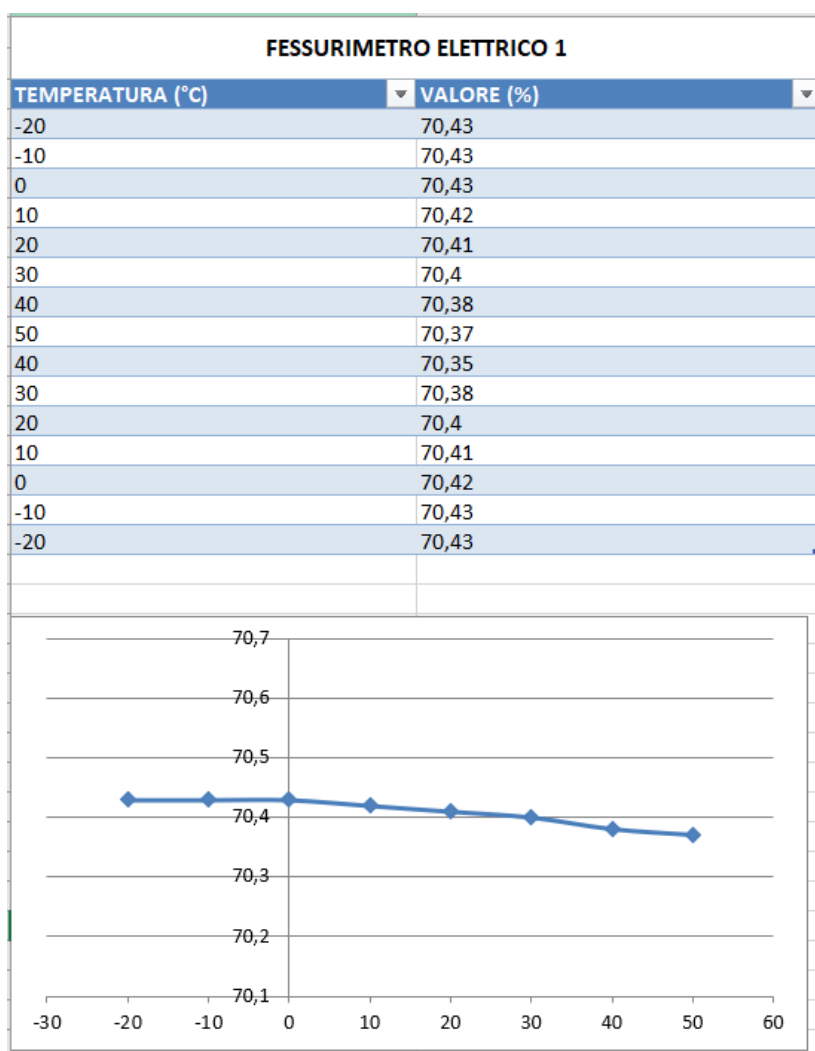
Tabella 13 - verifica estensimetro resistivo in camera climatica



3.2.3 Fessurimetro elettrico

Altro strumento poco sensibile alle variazioni di temperatura è il fessurimetro elettrico. Il suo funzionamento e la sua struttura non presuppongono organi intermedi che possono rendere errata la misurazione per variazioni di temperatura. Infatti lo spostamento all'interno del sensore avviene tra due piccoli tubi di acciaio inox tra loro concentrici e il segnale viene trasmesso alla centralina facendo variare il campo elettrico al suo interno.

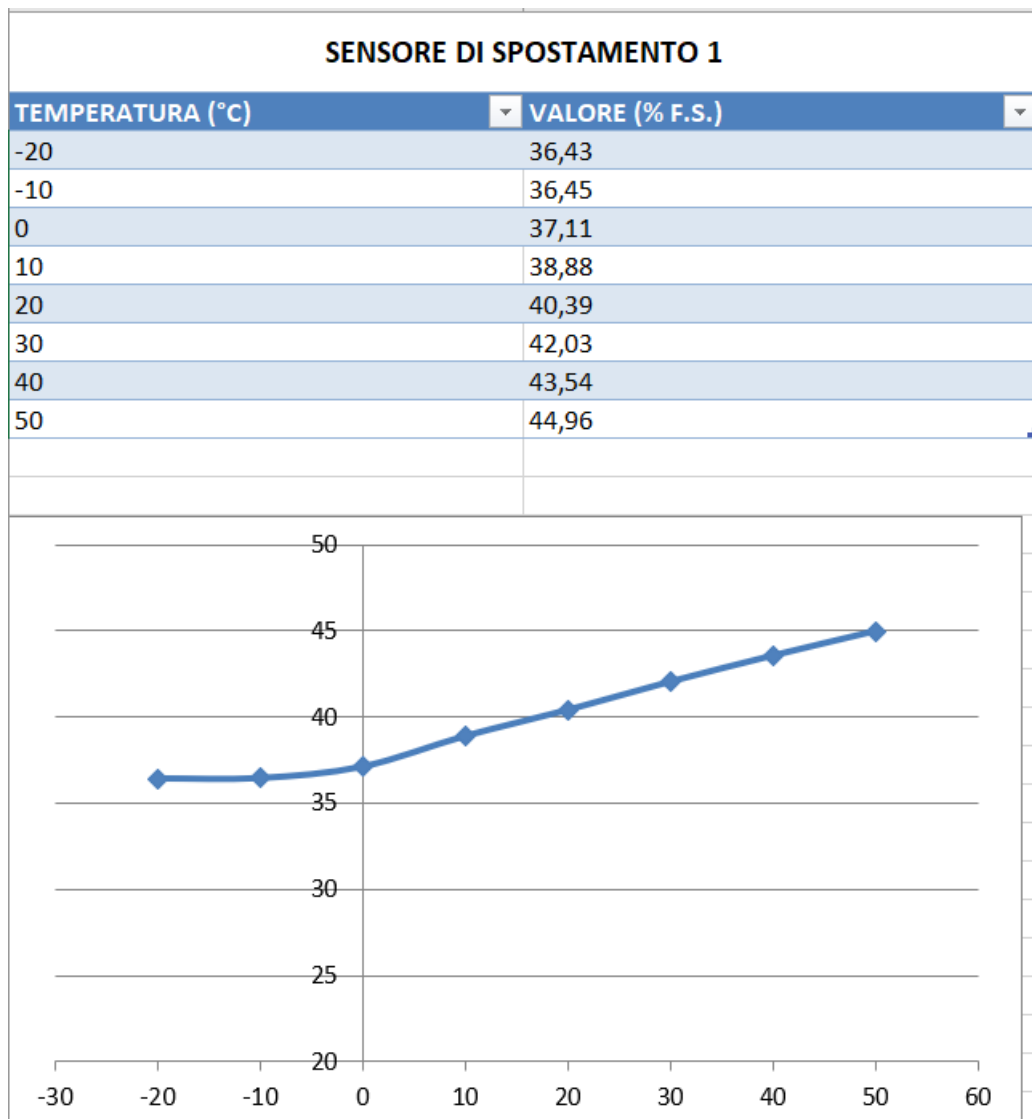
Tabella 14 - verifica fessurimetro elettrico in camera climatica



3.2.4 Sensore di spostamento

Il sensore di spostamento a molla, come per l'estensimetro resistivo, subisce grandi variazioni nella misurazione. Il motivo è però completamente diverso in quanto, mentre il secondo è causa della resina al suo interno, il primo è causato dalla molla stessa presente tra gli organi in movimento. Subisce variazioni nella sua struttura (rigidezza e flessibilità) per variazioni di temperatura e con il tempo può essere soggetta a irreversibilità che ne compromette il funzionamento.

Tabella 15 - verifica sensore di spostamento in camera climatica



3.2 Modifica sensori alla sorgente del fiume Potenza

L'attività svolta all'interno del laboratorio aziendale è stata affiancata anche da lavori svolti sul campo sia per quanto riguarda l'installazione che la calibrazione dei sensori. Quello di maggiore interesse ha riguardato la modifica di un particolare sensore chiamato "stramazzo" che viene posto in corrispondenza di un corso d'acqua per la stima e la misurazione della portata.

Il lavoro si è svolto sul fiume Potenza che nasce sul monte Vermenone (Fiuminata) e attraversando le Marche sfocia nella città di Porto Recanati.



Figura 24 - cartina geografica fiume Potenza

Il sensore, dopo un anno di registrazione dei dati in corrispondenza della sorgente, risultava non idoneo per la misurazione durante tutto l'anno solare in quanto nel periodo invernale la portata circolante attraverso lo strumento era talmente elevata da non essere letta.

Per questo motivo si è resa necessaria la modifica andando a variare la forma della bocca di ingresso dello strumento.

Il funzionamento e il criterio di misurazione risulta molto semplice in quanto lo stramazzo va a leggere una portata differenziale tra ingresso e uscita e di conseguenza la portata del corso d'acqua nell'unità di tempo.



Figura 25 - misuratore di portata

La modifica del sensore è stata effettuata andando ad aumentare le dimensioni della bocca di ingresso che è costituita da un'apertura a V. Lo stramazzo è stato quindi rimosso in un primo tempo e poi, dopo la modifica, riposizionato nell'apposita sede. Successivamente tramite la centralina di lettura posta all'esterno, ma comunque all'interno di un involucro isolato termicamente (le temperature nel periodo invernale raggiungono anche valori di $-10/-15\text{ }^{\circ}\text{C}$), se ne è verificato il corretto funzionamento. Lo stramazzo ha il pregio di effettuare misurazioni molto ravvicinate tra loro (ogni 2 secondi) e permette di andare a verificare sia la portata istantanea che la portata media circolante alla sorgente del corso d'acqua.

Installazioni di questo genere sono presenti in tutti i corsi d'acqua dell'entroterra maceratese e posizionati in cornici anche molto suggestive e all'interno di grotte, come alla sorgente del fiume Nera, e permettono in modo molto semplice di andare a verificare e stimare la portata d'acqua circolante negli acquedotti comunali e alle utenze poste a valle.

CONCLUSIONI

Nell'elaborato si evince il ruolo fondamentale che ricopre la taratura, l'analisi e la verifica dei sensori per aziende che si muovono nel settore.

La produzione in se stessa lascerebbe un grande margine di errore poiché anomalie nel funzionamento sono insite sia per realizzazioni automatizzate sia manuali.

La verifica ricopre un ruolo basilare ed è collocata al termine del ciclo di produzione e permette sia di individuare i prodotti finiti soggetti a scarto, poiché non rientrano nelle specifiche tecniche a cui lo strumento deve sottostare, sia di migliorare e potenziare il prodotto in alcune caratteristiche grazie alla ricerca e allo sviluppo di nuovi materiali più prestazionali.

Ci sono sensori che necessitano obbligatoriamente del controllo prima di essere consegnati, come ad esempio le celle di carico, poiché svolgono un ruolo di importanza notevole nei loro campi di misura e per cui ci sono ammessi solo piccoli margini di errore. Altri, invece, consentono una verifica per campione a seconda della mole di apparecchiature prodotte.

Nel dichiarare i dati deducibili dalla taratura all'interno dei cataloghi è buona norma tenersi un margine di errore più o meno ampio a seconda del tipo di sensore ma dall'esperienza si denota che tutti i valori sono di gran lunga al di sotto di quelli dichiarati.

L'esperienza in azienda permette di ampliare le conoscenze sulla messa in pratica della taratura statica, andando a porre notevole importanza sulle procedure di posizionamento dei sensori ai propri banchi di taratura, e permette di comprendere come la riferibilità degli strumenti sia alla base del processo e della catena di misura.

La parola "riferibilità" è il filo comune che lega tutti i processi di taratura degli strumenti ed è proprio questo aspetto, collegato alla tecnologia dei sensori di supporto alla misurazione, che rende la catena di misura più precisa e utile dal punto di vista ingegneristico.

BIBLIOGRAFIA

Ernest O. Doebelin, *Measurement systems: application and design*, McGraw-Hill

Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI) UNI CEI ENV 13005, *Guida all'espressione dell'incertezza di misura*, 2000, UNI

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *International Vocabulary of Metrology, Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, III ed., Pavillon de Breteuil

Marina Patriarca, Fernando Chiodo, *Quantificazione dell'incertezza nelle misure analitiche*, seconda edizione Guida EURACHEM/CITAC

RINGRAZIAMENTI

Volevo dedicare questo spazio a chi ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato, partendo dall'analisi sperimentale fino ad arrivare alla stesura completa.

Un ringraziamento particolare va al professore Gian Marco Revel che mi ha seguito con grande disponibilità in questi ultimi mesi, dandomi consigli molto utili per la redazione della tesi, e per avermi suscitato grande interesse per la materia in questione durante le lezioni.

Ringrazio anche Francesco Pascarella e sua moglie Silvia per avermi dato la possibilità di effettuare il tirocinio formativo presso la loro azienda, la Gestecno, e per avermi dato gli spunti e i mezzi necessari, tramite l'esperienza pratica della taratura degli strumenti, per iniziare il lavoro di tesi.