

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO

*(Classe delle Lauree in Ingegneria Civile ed Ambientale, Classe N. L-7)*

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

TESI DI LAUREA

“**SENSORI PER LA MISURA DI GRANDEZZE  
DI  
INTERESSE GEOTECNICO**”

**RELATORE**

Ch.mo Prof. Gianfranco Urciuoli

**CANDIDATO**

Michele Lucci MATR. N49/005

**CORRELATORE**

Dott. Ing. Raffaele Papa

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

# OBIETTIVO DELLA PRESENTAZIONE

Il monitoraggio geotecnico, effettuato mediante la messa in opera di strumenti con adeguate caratteristiche, contribuisce alla raccolta degli elementi necessari per la progettazione degli interventi di consolidamento e la gestione di opere geotecniche, con la FINALITA' di adottare la strategia più idonea per la mitigazione del rischio di frana.



Ispezionare  
e  
Monitorare

*Per evitare o  
ridurre*

Le conseguenze catastrofiche di dissesti idrogeologici (che si manifestano con processi di instabilità dei pendii) ai fini della Protezione Civile

# CONTENUTI DELLA PRESENTAZIONE

## 1. MISURARE

- 1.1 Gli strumenti di misura e il monitoraggio geotecnico

## 2. I TERRENI PARZIALMENTE SATURI

- 2.1 Misure di suzione: i tensiometri

## 3. MISURE DI PRESSIONI NEUTRE

- 3.1 I piezometri a tubo aperto e le celle piezometriche

## 4. MISURE DI SPOSTAMENTI SUPERFICIALI

- 4.1 L'estensimetro Strain Gauges
- 4.2 Il Ponte di Wheatstone per gli strain gauges

## 5. MISURE DI CONTENUTO D'ACQUA

- 5.1 Metodi indiretti - Time Domain Reflectometry (TDR): una tecnica ampiamente affermata
- 5.3 Applicazione in Laboratorio: considerazioni sulle misure ottenute

## 6. CONCLUSIONI

# 1. MISURARE

## 1.1 Gli strumenti di misura e il Monitoraggio Geotecnico

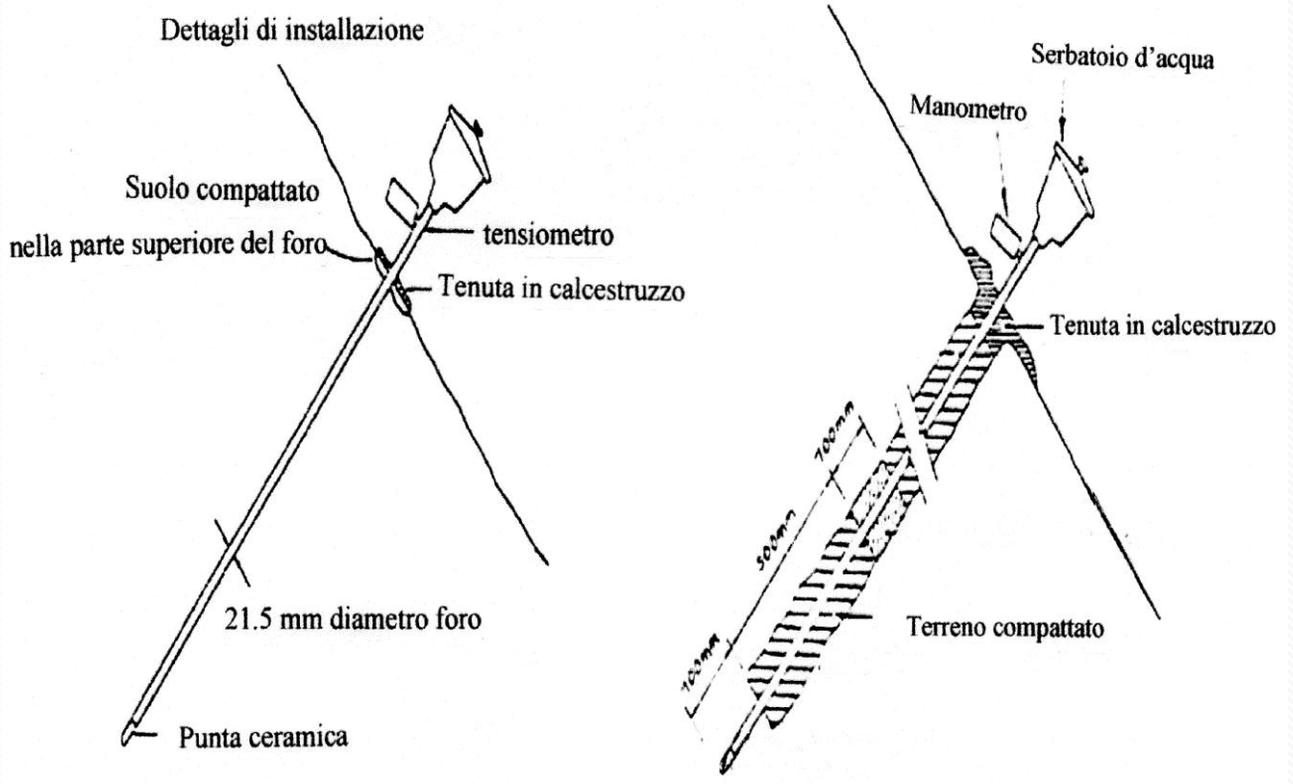
*Il monitoraggio geotecnico consiste nella installazione di un'appropriata strumentazione in grado di misurare tutte le grandezze fisiche che contribuiscono alla progettazione degli interventi di consolidamento e il controllo del comportamento di opere a rischio. In tabella si riproducono alcune grandezze geotecniche con i relativi strumenti di misura:*



VARIABILI	STRUMENTI
Pressioni interstiziali e livello d'acqua nel terreno	Piezometri – Celle piezometriche
Suzione	Tensiometri
Cedimenti e spostamenti relativi	Estensimetri
Contenuto d'acqua	Sonde TDR

## 2. I TERRENI PARZIALMENTE SATURI

Nei terreni parzialmente saturi la suzione di matrice è la differenza tra la pressione esercitata dall'aria nei pori e quella dell'acqua.

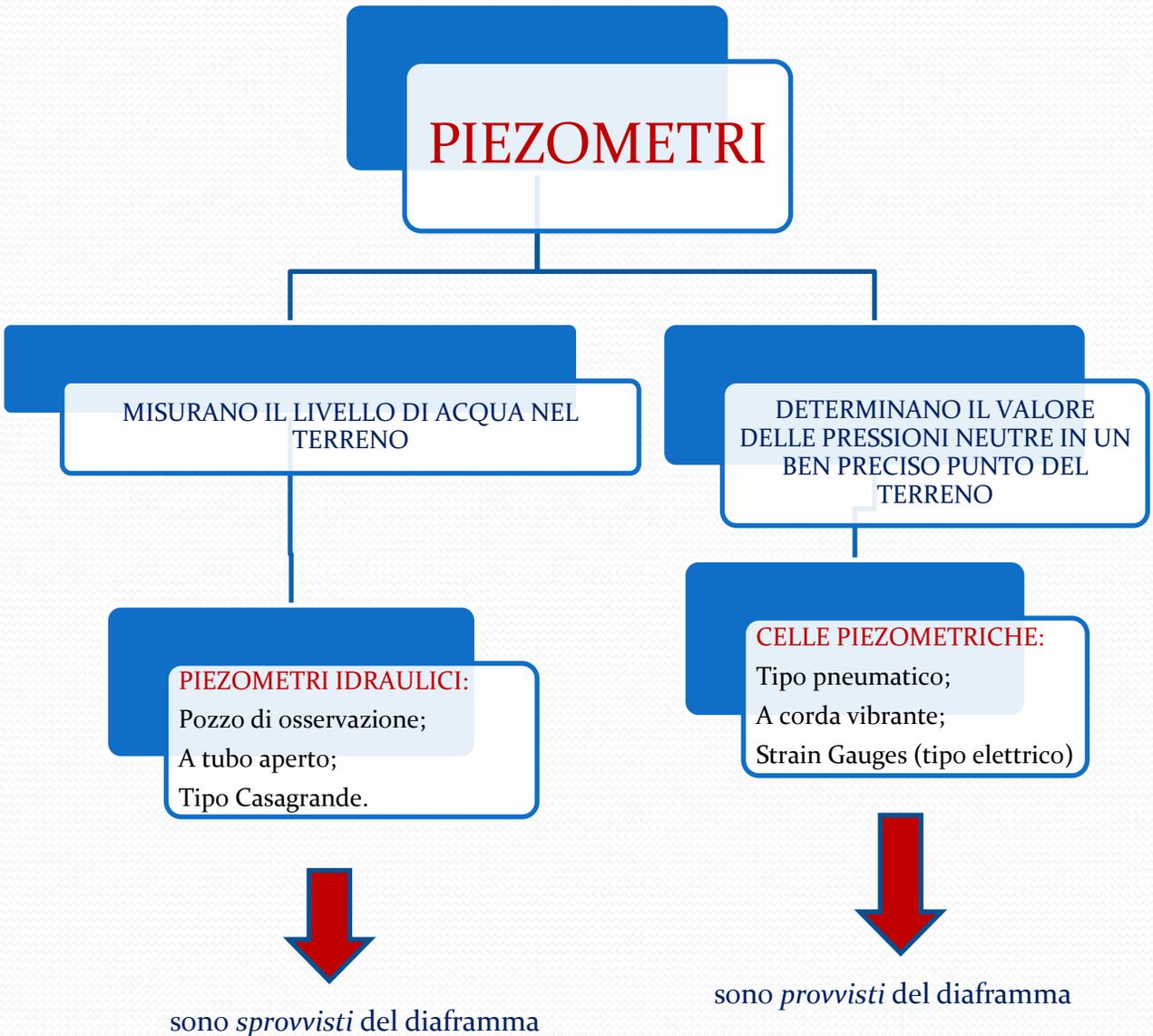


L'acqua contenuta nel tubo, per effetto della suzione, filtra attraverso la ceramica porosa e determina una depressione nel serbatoio dell'acqua, rilevabile con un manometro (può essere utilizzato anche un trasduttore di pressione che converte il valore di pressione in un segnale in volt).

Il metodo è semplice, ma il campo di misura della suzione è limitato a circa 80-90 kPa dalla possibilità di cavitazione dell'acqua nel tensiometro.

# 3. MISURE DI PRESSIONE NEUTRA

## 3.1 I piezometri a tubo aperto e le celle piezometriche



*Il diaframma separa la cavità interna delle celle piezometriche dividendola in 2 camere. Al variare della pressione dell'acqua nel terreno varia la pressione nella camera idraulica che produce una deformazione della membrana misurabile con un trasduttore.*

## ❖ Pozzo di osservazione & Piezometro a tubo aperto

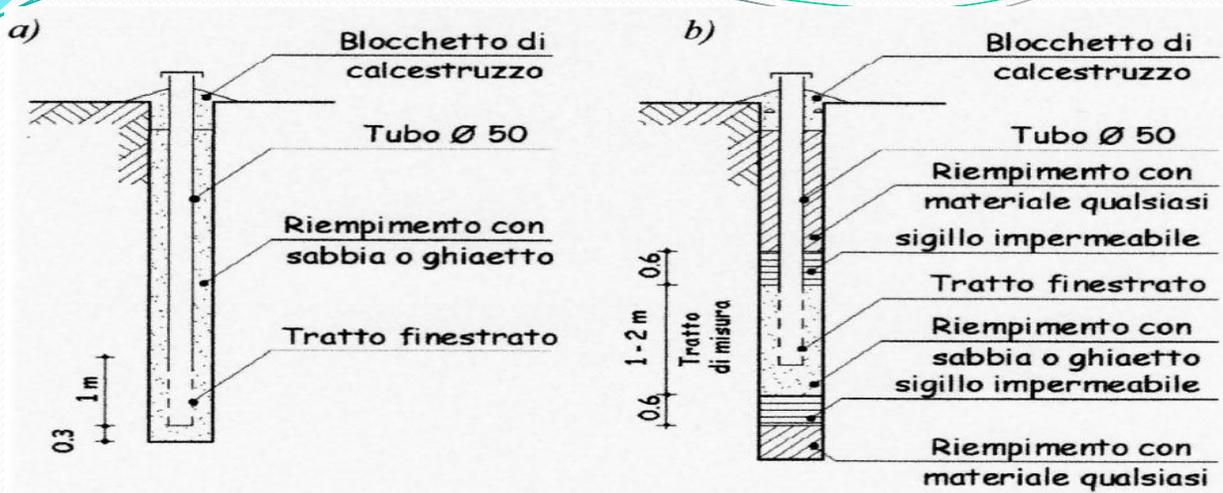


Figura 5: a) pozzo di osservazione; b) piezometro aperto a tubo fisso

## ❖ Piezometro Casagrande

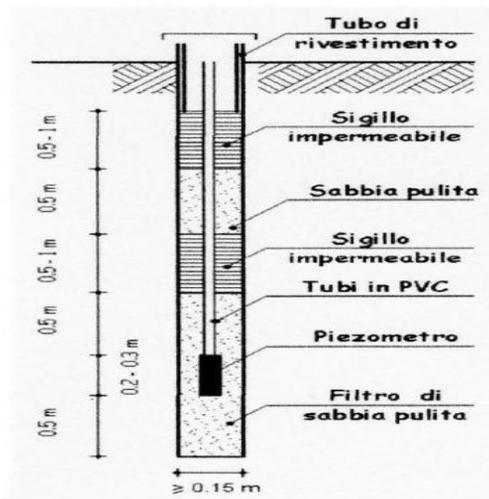


Figura 6: Schema di installazione del piezometro di Casagrande



**SONDA GALVANOMETRICA:** è lo strumento utilizzato per la lettura del livello dell'acqua. E' composto da 2 conduttori collegati ad un'estremità agli elettrodi di una batteria, ed all'altra ciascuno con un cilindro di acciaio INOX. Quando il cilindro tocca l'acqua il circuito si chiude attivando un avvisatore acustico o visivo. Misurando la lunghezza del cavo calato nel tubo si trova la quota dell'acqua.

# CELLE PIEZOMETRICHE

## ❖ Tipo Pneumatico

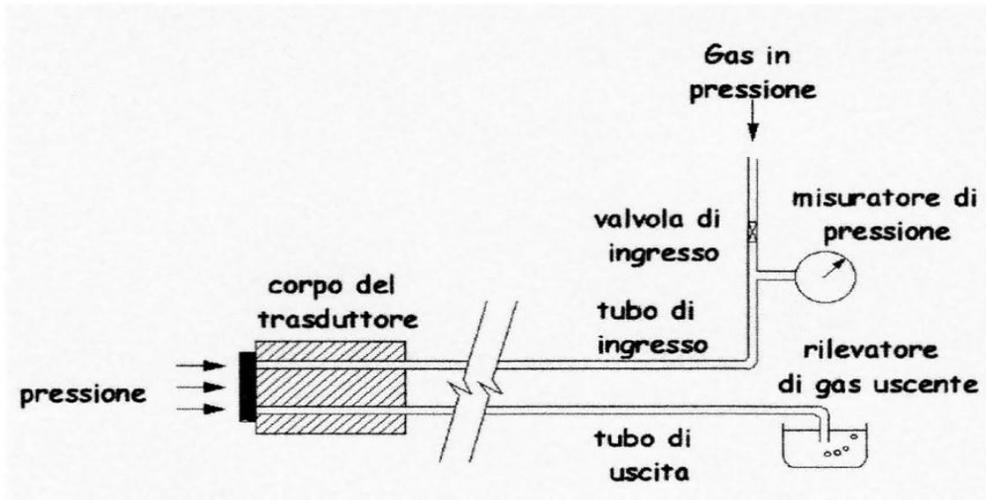
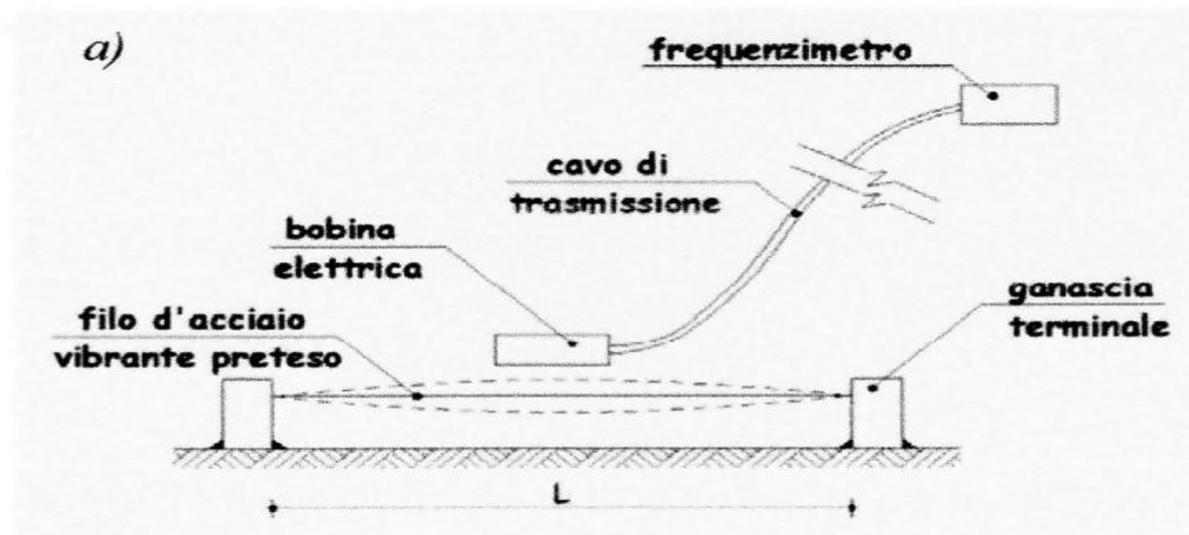


Figura 13: Schema del funzionamento del piezometro pneumatico

## ❖ A corda vibrante



# LE CARATTERISTICHE DEI TRASDUTTORI ELETTRICI DI PRESSIONE

Il **trasduttore di pressione** è un dispositivo che legge una grandezza presente in **ingresso** (**PRESSIONE**) e ne genera un'altra in **uscita** (**TENSIONE O CORRENTE**), proporzionale alla prima. Tipicamente, un trasduttore rileva una grandezza fisica e genera un proporzionale segnale elettrico. Il segnale d'ingresso e quello d'uscita sono legati da una legge nota (la **Transcaratteristica**) del trasduttore.

## **PRESTAZIONE DEGLI STRUMENTI E CRITERI PER LA SCELTA**

La scelta del trasduttore influenza le caratteristiche statiche dello strumento quali:

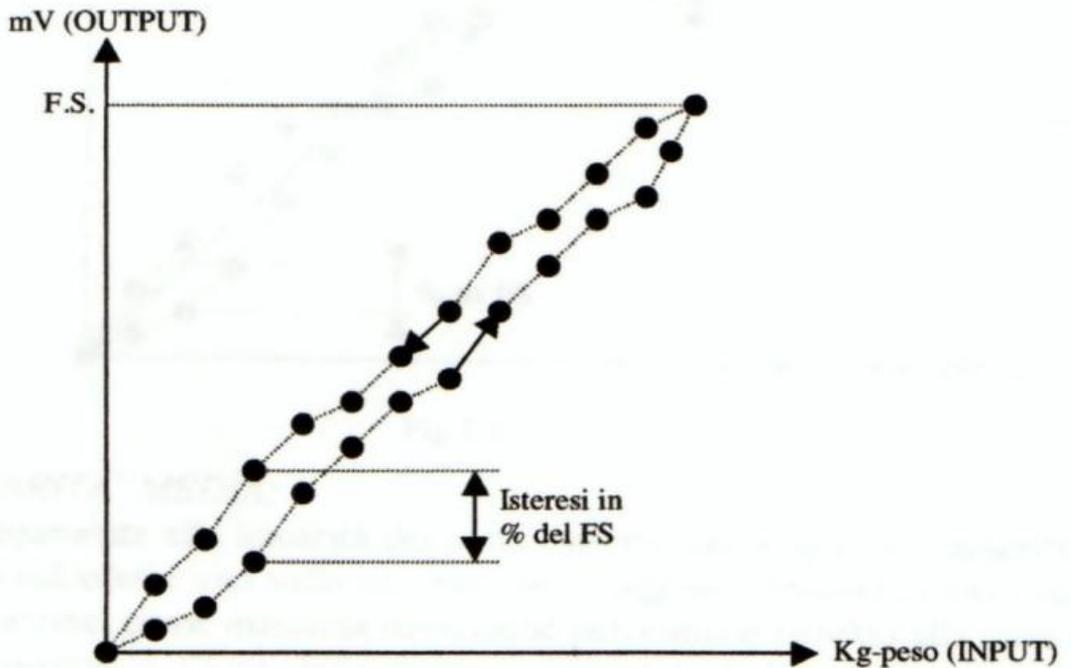
**Accuratezza:** *esprime la differenza fra il valore ideale e quello reale della misura*

**Risoluzione:** *è la più piccola variazione dell'ingresso che provoca una variazione dell'uscita.*

**Ripetibilità:** *è l'attitudine del trasd. a produrre la stessa uscita quando si effettuano ripetute applicazioni successive di uno stesso ingresso.*

**Range:** *è l'intervallo di valori in cui il trasd. lavora secondo i parametri stabiliti*

**Isteresi:** *è l'attitudine del trasd. a proporre la stessa identica uscita sia nel caso che l'ingresso di riferimento venga raggiunto da valori inferiori, sia nel caso che venga raggiunto da valori superiori.*



Classico andamento di isteresi tra ingresso e uscita

UN BUON TRASDUTTORE DEVE AVERE AMPIO RANGE, ALTA SENSIBILITA', BASSA RISOLUZIONE, ASSENZA D'ISTERESI.

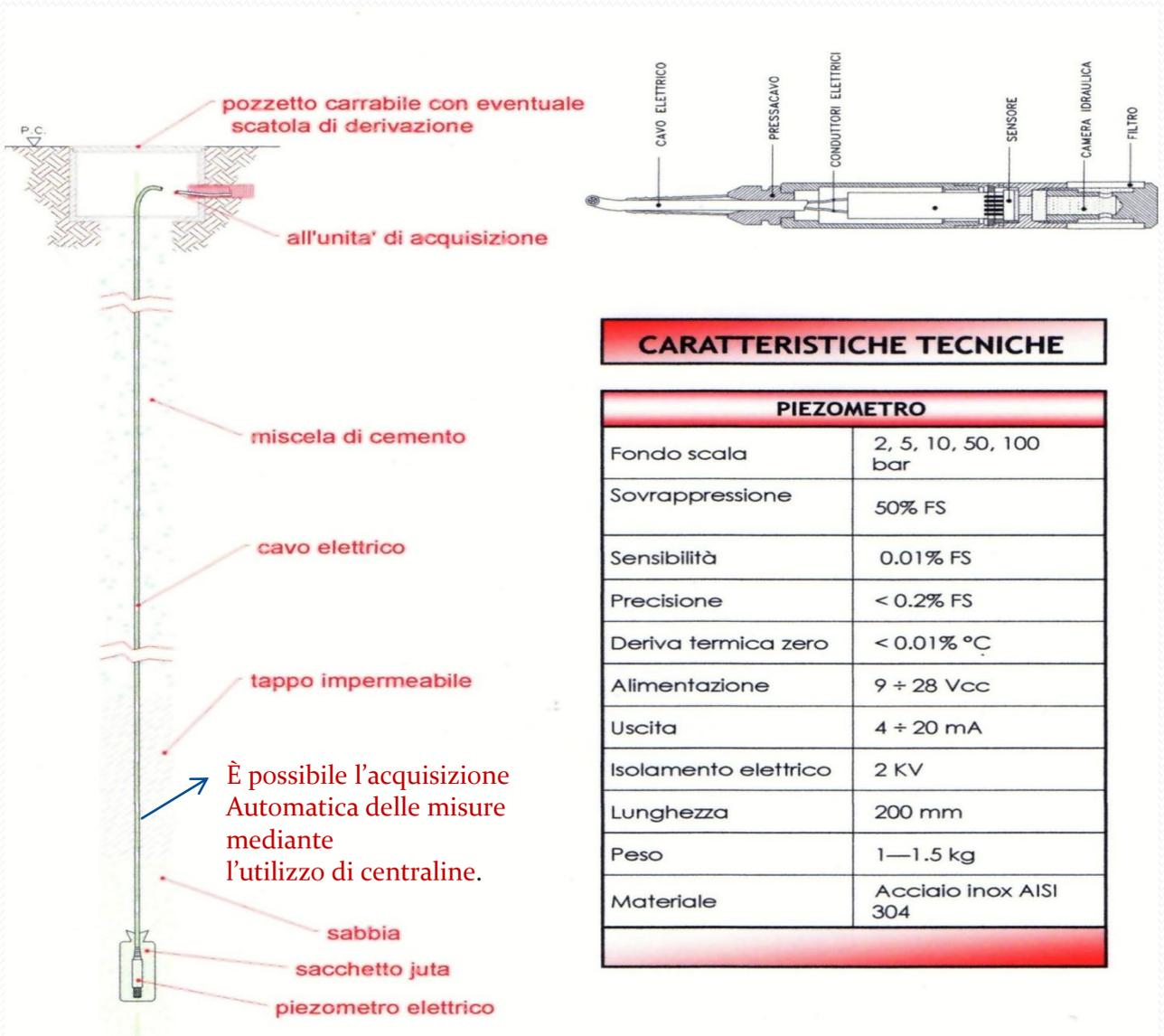
### TRASDUTTORE

Meccanici

Elettrici

Entrambi generalmente sfruttano per il rilevamento della pressione la deflessione o la deformazione su un elemento elastico sensibile, con conseguente generazione di un segnale meccanico/elettrico correlato

# PIEZOMETRO STRAIN GAUGES (Estensimetrico)



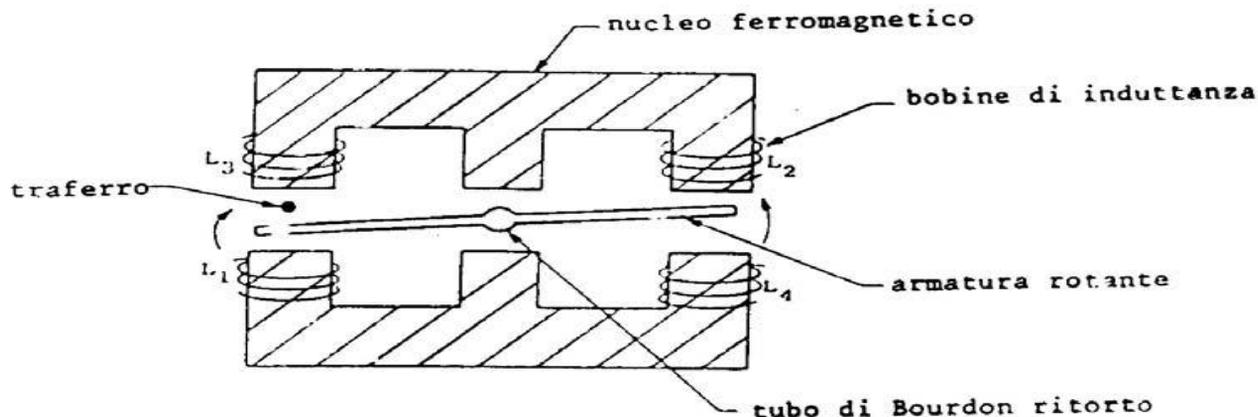
## CARATTERISTICHE TECNICHE

PIEZOMETRO	
Fondo scala	2, 5, 10, 50, 100 bar
Sovrappressione	50% FS
Sensibilità	0.01% FS
Precisione	< 0.2% FS
Deriva termica zero	< 0.01% °C
Alimentazione	9 ÷ 28 Vcc
Uscita	4 ÷ 20 mA
Isolamento elettrico	2 KV
Lunghezza	200 mm
Peso	1—1.5 kg
Materiale	Acciaio inox AISI 304

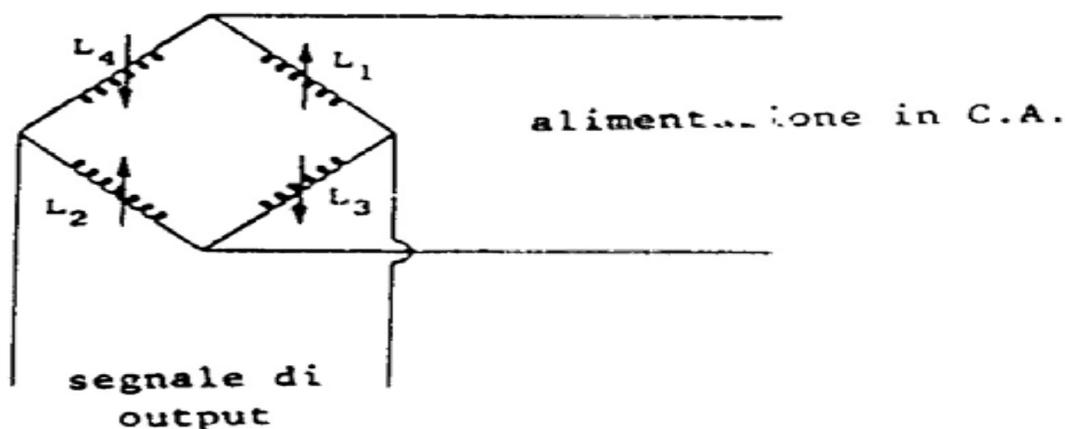
La “sonda pressoria” è costituita da un diaframma facente da basamento per una strain gage “laminare”. Per effetto della pressione del fluido, il diaframma subisce una flessione prontamente trasdotta (dalla gage) in variazione di resistenza.

Fra i vari **Vantaggi** si annoverano il basso costo, la prontezza, la buona accuratezza e stabilità rispetto alle variazioni di temperatura. Fra i vari **Svantaggi** si annoverano l'elevata isteresi, la non compensazione della temperatura, la bassa stabilità nel tempo.

# Trasduttori induttivi



*Il nucleo ferromagnetico, costituito o da un diaframma metallico o da un corpo di ferro che si muove grazie all'interazione con un diaframma magnetico è posto tra due induttanze perfettamente uguali e si muove in funzione della pressione applicata.*



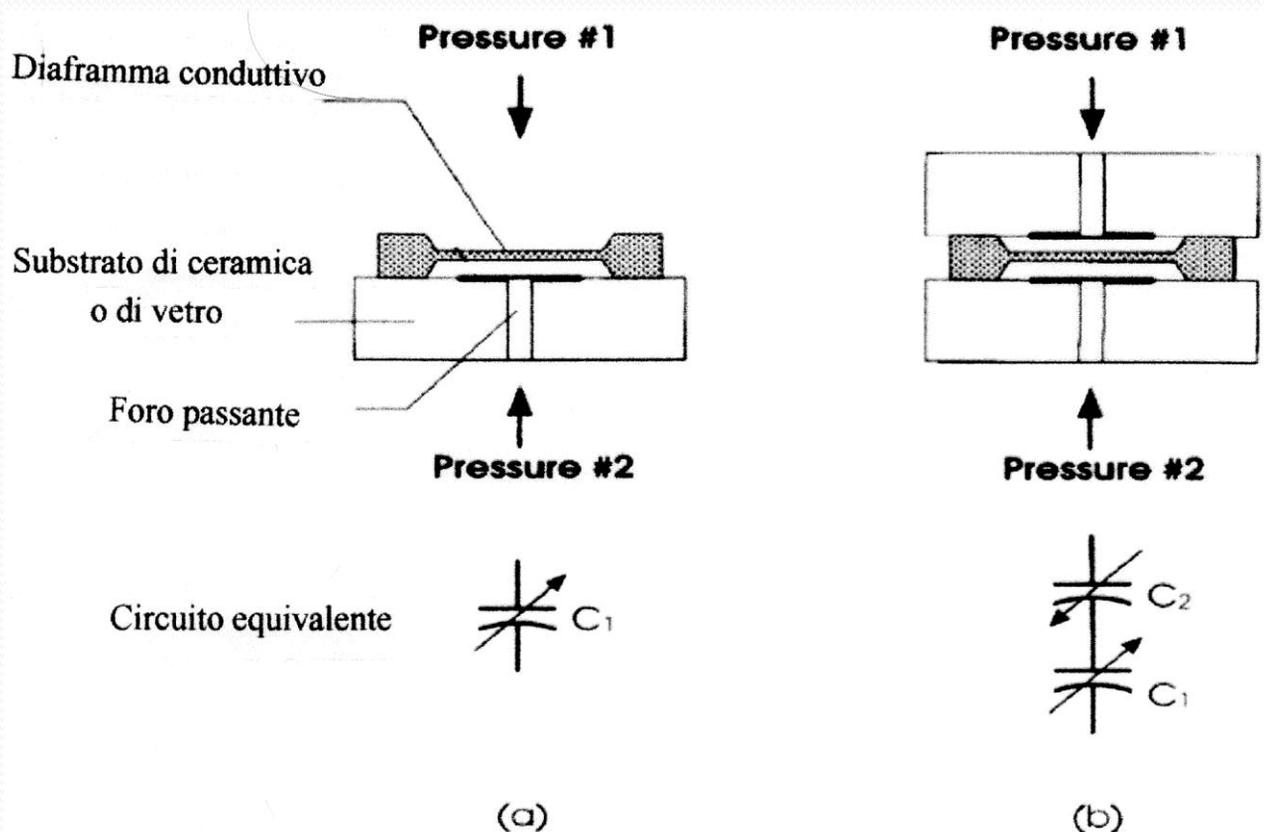
c) schema elettrico

*E' utilizzato esclusivamente per la misura di pressione differenziale o relativa*

*I trasduttori induttivi presentano alta sensibilità, buona risoluzione, bassa isteresi, e non essendoci contatto tra il nucleo centrale e le spire del trasformatore l'attrito è molto basso.*

# Trasduttori Capacitivi

Il principio di misura si basa sulla variazione della capacità elettrica causata dalla deflessione di una delle due armature



Principio di funzionamento dei sensori di pressione capacitivi (a) Design di un condensatore singolo (b) Design di un condensatore differenziale

## TECNOLOGIE

- Singolo statore
- Doppio Statore

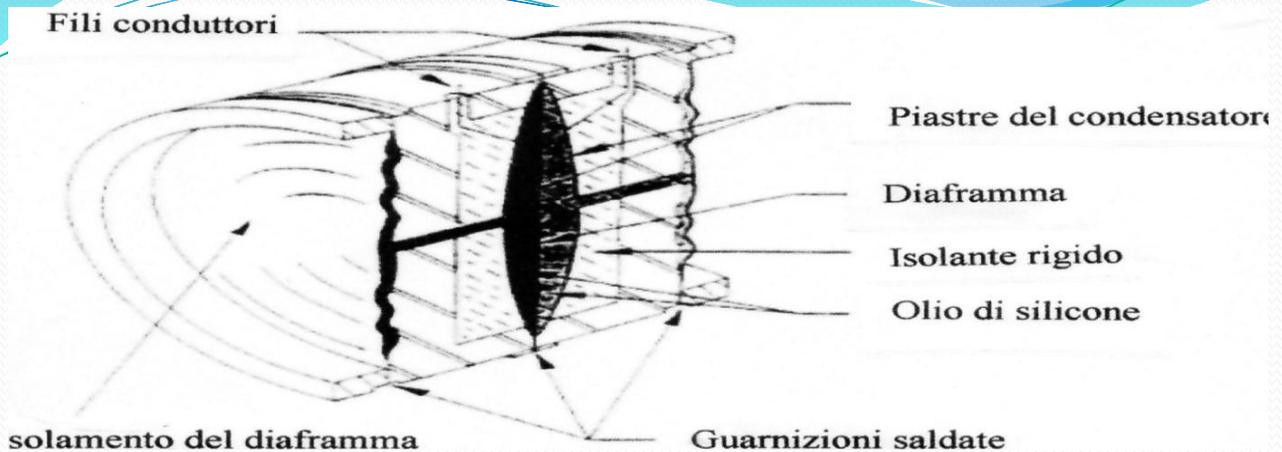
## VANTAGGI

- Elevata sensibilità e precisione;
- Ridotta isteresi;
- Elevata linearità;
- Buona risposta in frequenza

## SVANTAGGI

- Elevato costo;
- Lieve dipendenza dalla temperatura e dalle proprietà dielettriche del fluido di misura

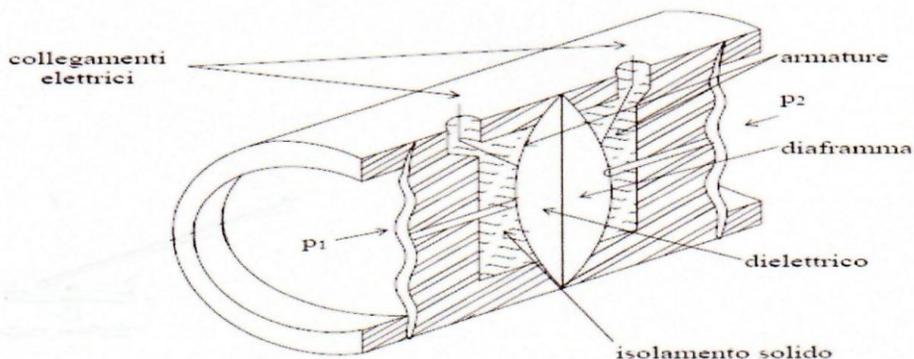
# Trasduttori capacitivi a singolo statore



*E' presente un solo condensatore formato da un armatura fissa e da una mobile data dal diaframma stesso. La deformazione subita dall'elemento elastico provoca una variazione dello spessore dello strato di dielettrico e di conseguenza una variazione di capacità del co*



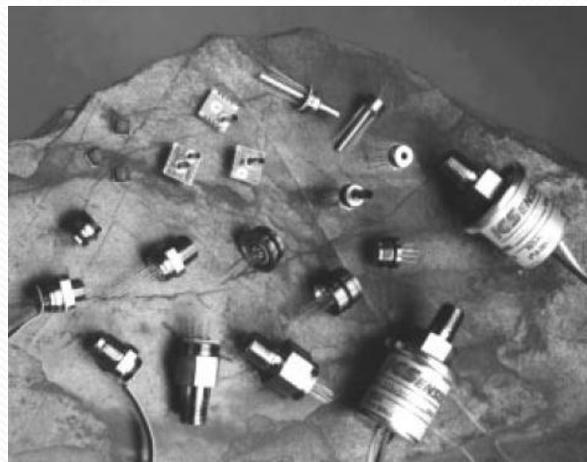
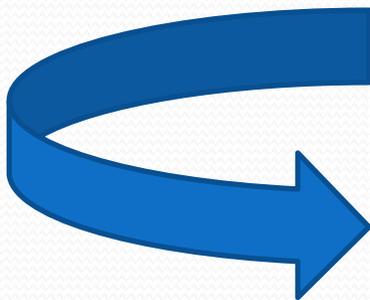
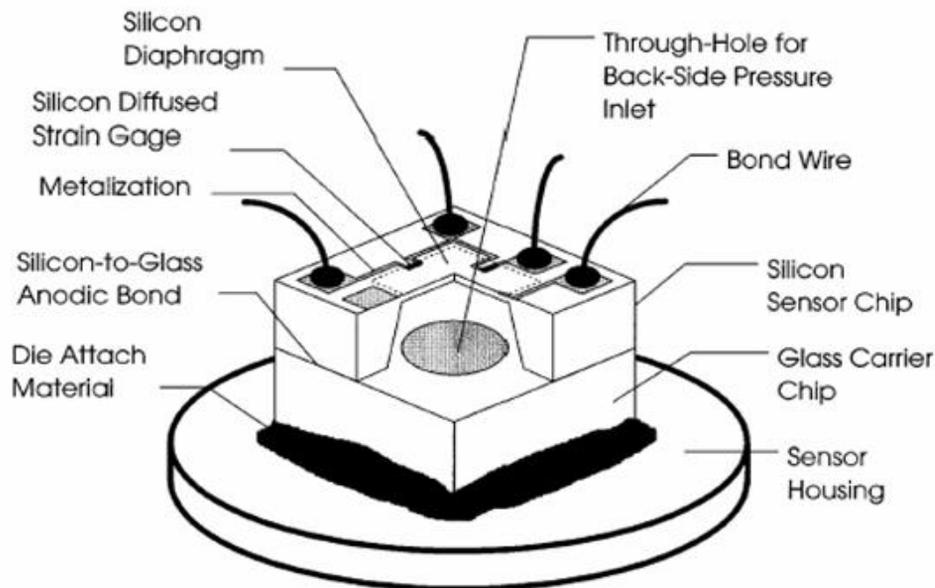
# Trasduttori capacitivi a doppio statore



*La variazione di pressione applicata al diaframma comporta una doppia variazione di capacità che viene prontamente convertita in un segnale normalizzato 4 - 20 mA.*

# Trasduttori Piezoresistivi

Il principio di misura si basa sull'effetto piezoresistivo di semiconduttori (normalmente silicio) sottoposti a sollecitazione meccanica. I principali campi di utilizzo sono per pressione assoluta, differenziale e relativa.



## TECNOLOGIE

- Cristallo in quarzo
- Ceramica piezoelettrica

## VANTAGGI

- Buona risposta in frequenza
- Elevata compensazione termica
- Basso costo

## SVANTAGGI

- Temperatura di impiego limitata
- Limitata resistenza alle sovratensioni

Tipo di trasduttore	Range	Accuratezza tipica (% FS)	Vantaggi	Svantaggi
Estensimetrico	Fino a 1 GPa	0.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Buona compensazione termica;</li> <li>•Buona stabilità a lungo termine;</li> <li>•Alimentazione in c.a. o in c.c.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Basso segnale di uscita;</li> <li>•Alta sensibilità di urti e vibrazioni</li> </ul>
Potenzimetrico	100 Kpa	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alto segnale di uscita;</li> <li>•Costo limitato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Vita limitata;</li> <li>•Elevata isteresi</li> </ul>
Induttivo	100 MPa	0.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alto segnale di uscita;</li> <li>•Bassa isteresi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sensibilità ai campi magnetici</li> </ul>
Capacitivo	200 KPa	0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tempo di risposta basso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sensibilità alla temperatura</li> </ul>
Piezoelettrici	100 MPa	0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Piccole dimensioni;</li> <li>•Alta risposta in frequenza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Adatto solo per misure dinamiche</li> </ul>

## 4.1 Estensimetri a resistenza (STRAIN GAUGES)

Il principio fisico su cui si basano gli estensimetri elettrici è semplice: l'allungamento di un conduttore filiforme è proporzionale alla variazione della resistenza interna.

Gauge Factor:

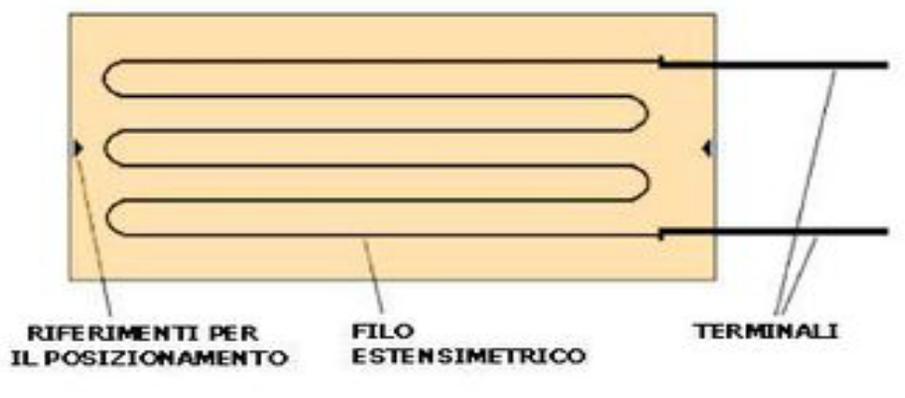
è il rapporto tra variazione di resistenza e suo valore iniziale rapportata alla deformazione.

Valori tipici sono  $K=2 - 3$

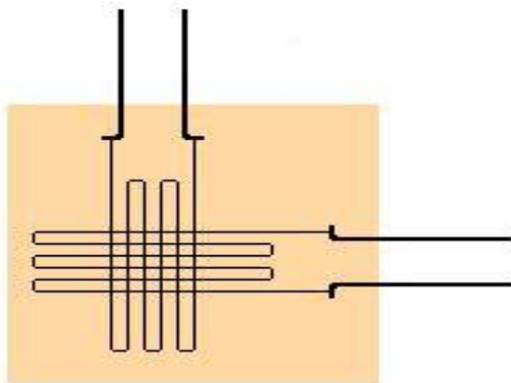
$$\varepsilon = \frac{1}{k} * \frac{\Delta R}{R_0}$$

Variazione della resistenza

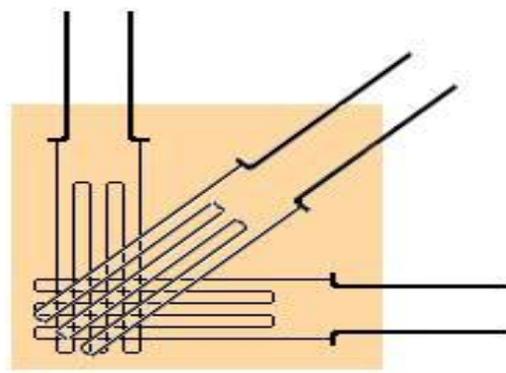
Resistenza iniziale



Misurando la variazione di resistenza tramite un ponte di Wheatstone, ci può risalire all'entità della deformazione.



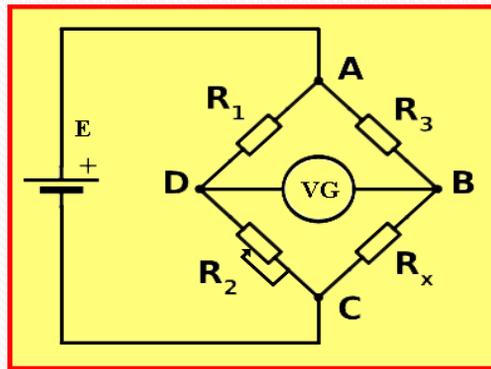
Estensimetro biassiale con griglie a 90°



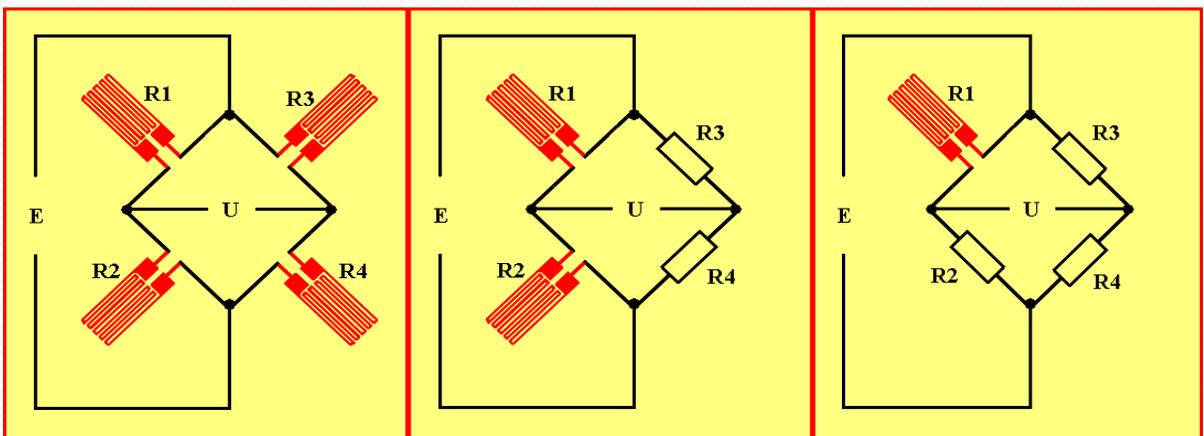
Estensimetro triassiale con griglia intermedia a 45°

## 4.2 Il Ponte di Whetstone per gli Strain gauges

Solitamente per gli estensimetri il condizionamento del segnale avviene attraverso il ponte di Wheatstone.



Si tratta di un circuito costituito da due coppie di resistenze ( $R_1, R_2, R_3$  e  $R_x$ ), messe a quadrato, sulle cui diagonali vi si trova un generatore di tensione  $E$  e un voltmetro che è disposto in modo da rilevare lo sbilanciamento tra i due rami del ponte.

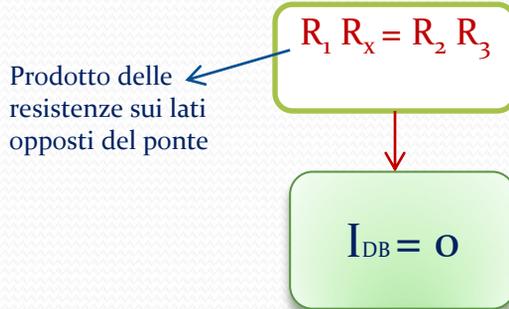


Ponte intero

mezzo ponte

quarto di ponte

Affinché l'estensimetro funzioni, occorre che si cominci con la misura dalla situazione di ponte bilanciato. Questa particolare situazione si ottiene quando la tensione  $\Delta V$  sul tratto di misura, sia nulla ( $V_B = V_D$ ). Il caso più semplice per avere tensione nulla, è quello di non avere passaggio di corrente  $\rightarrow I_{DB} = 0$ .



Relazione caratteristica del ponte:

$$E = \frac{V * K}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_3 + \varepsilon_2 - \varepsilon_x) = \frac{V * K * \varepsilon_T}{4}$$

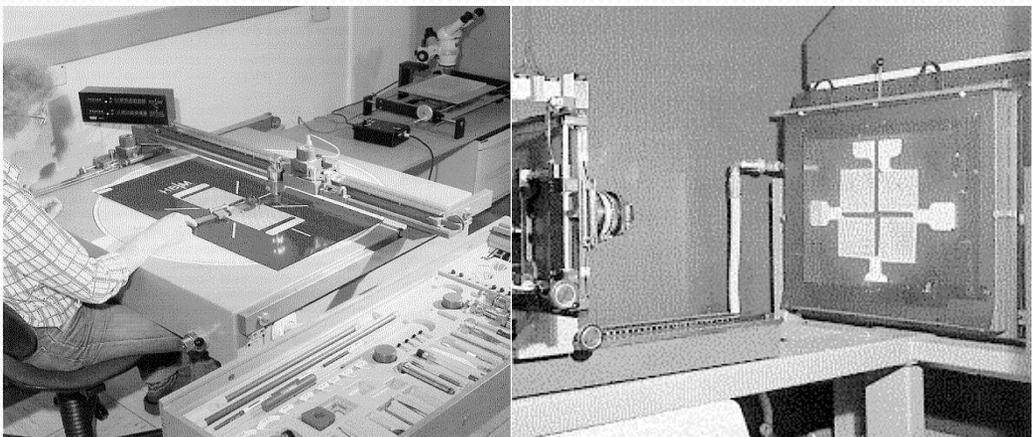
Tensione di alimentazione

Fattore di Taratura

Tensione misurata dal voltmetro

Deformazione totale

I collegamenti che vengono impiegati per la costruzione dei ponti devono compensare la deformazione termica apparente (vale a dire quella dovuta agli effetti termici quali **effetto Joule** e **irradiazione solare**), devono depurare la misura dagli effetti di deformazioni indesiderate ed inoltre innalzare il segnale misurato.



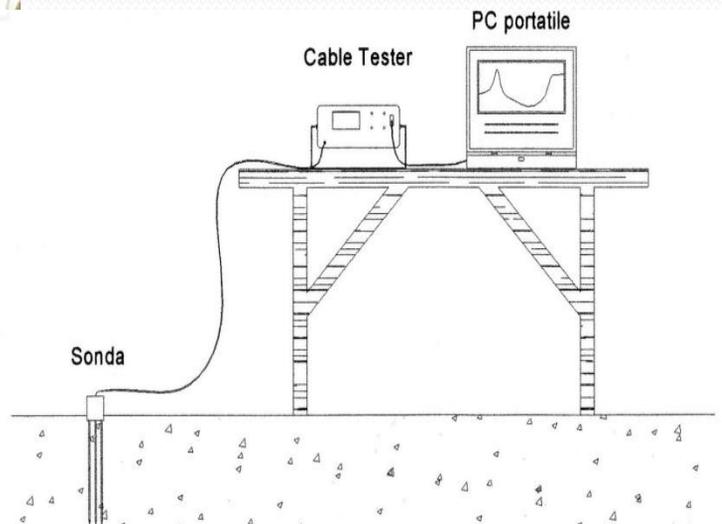
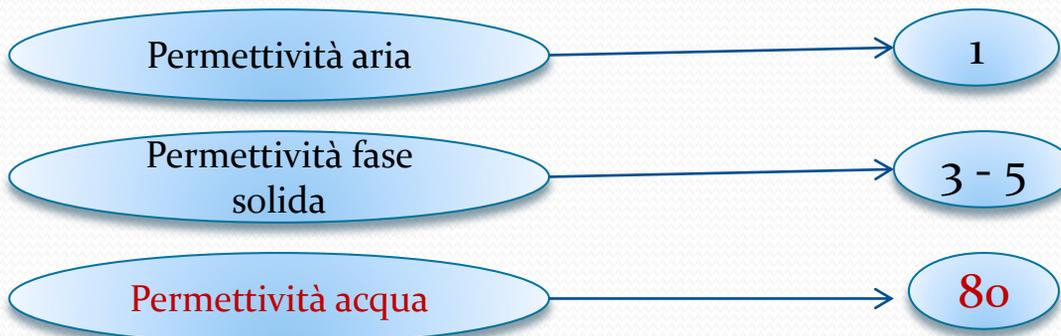
# 5. MISURE DI CONTENUTO D'ACQUA

## 5.1 Metodi indiretti

**I METODI INDIRETTI** si basano sulla misura di proprietà fisiche e fisico-chimiche del terreno variabili con il contenuto d'acqua. Il **primo vantaggio** di questi metodi è la velocità delle misure, a differenza dei metodi gravimetrici, in cui l'attesa per l'essiccazione del campione rende la procedura lenta e impegnativa. Il **secondo**, è quello di poter valutare il contenuto d'acqua direttamente in sito in modo economico e maneggevole.

Su questa esigenza è stata sviluppata la tecnica della **RIFLETTOMETRIA NEL DOMINIO DEL TEMPO (TDR=Time Domain Reflectometry)**

Tale tecnica si basa sulla correlazione tra il contenuto d'acqua volumetrico del terreno,  $\theta$ , e la permittività dielettrica relativa  $\epsilon$



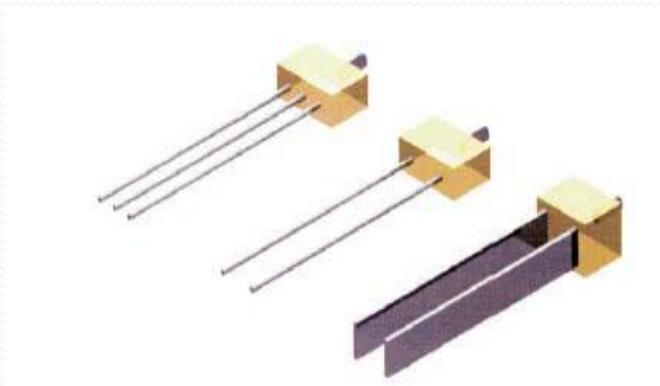
**METALLIC CABLE TESTER**

Esso è composto da:

- *Generatore di impulsi a gradino;*
- *Cavo coassiale;*
- *Campionatore;*
- *Oscilloscopio;*
- *Sonda TDR.*

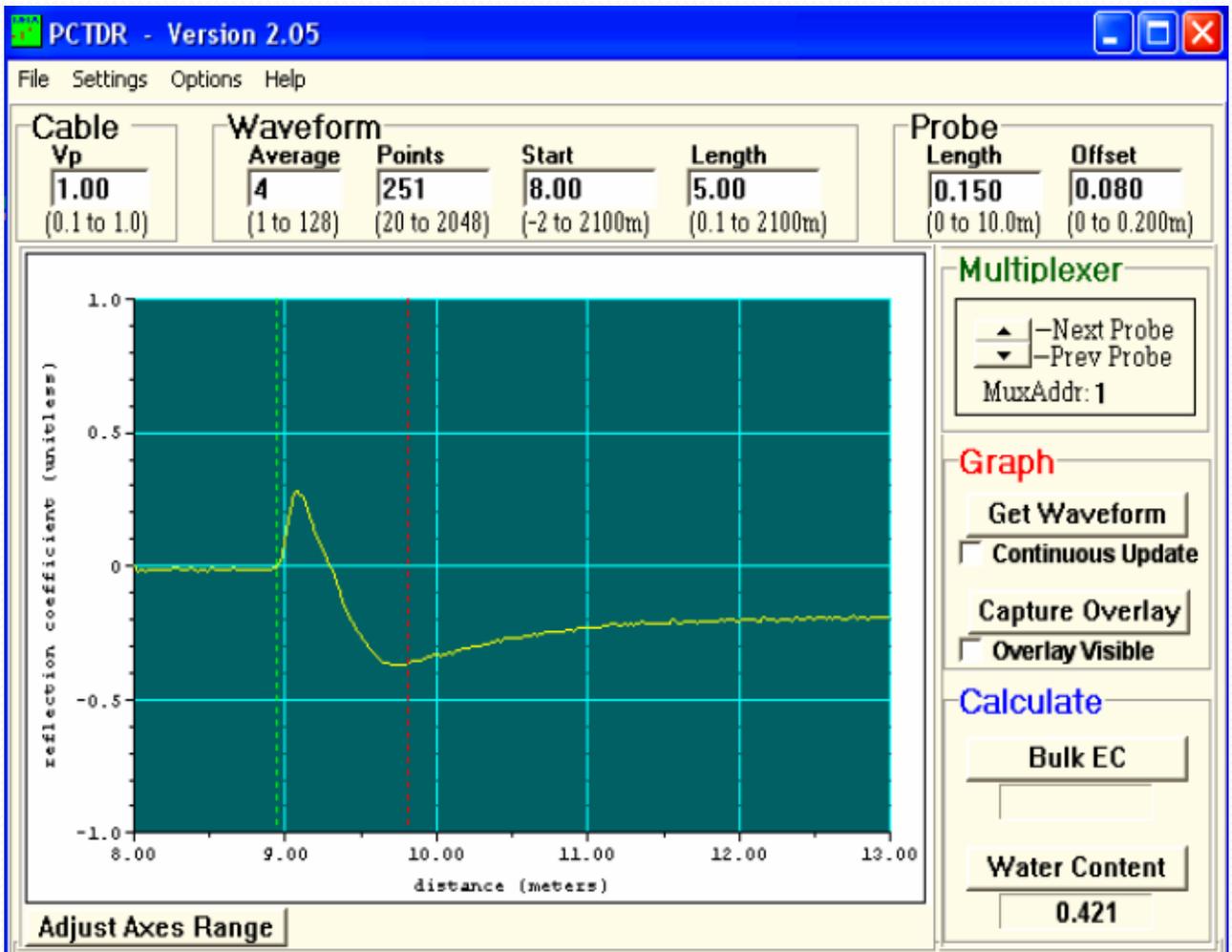
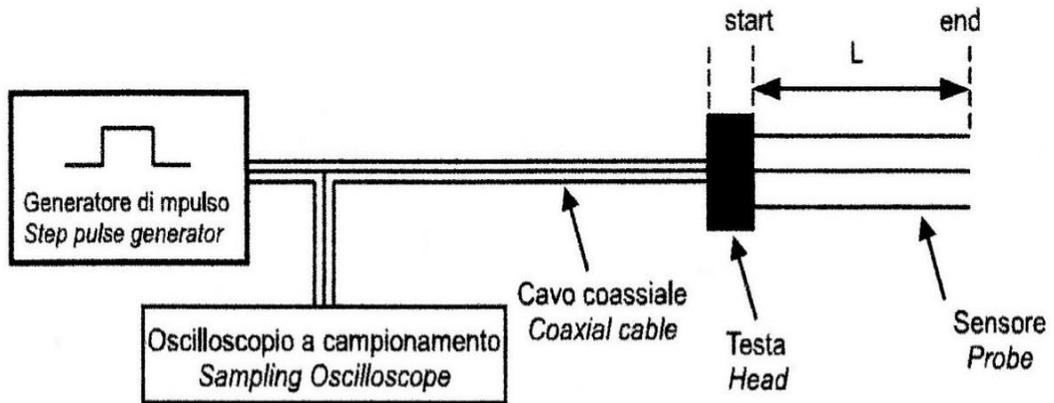


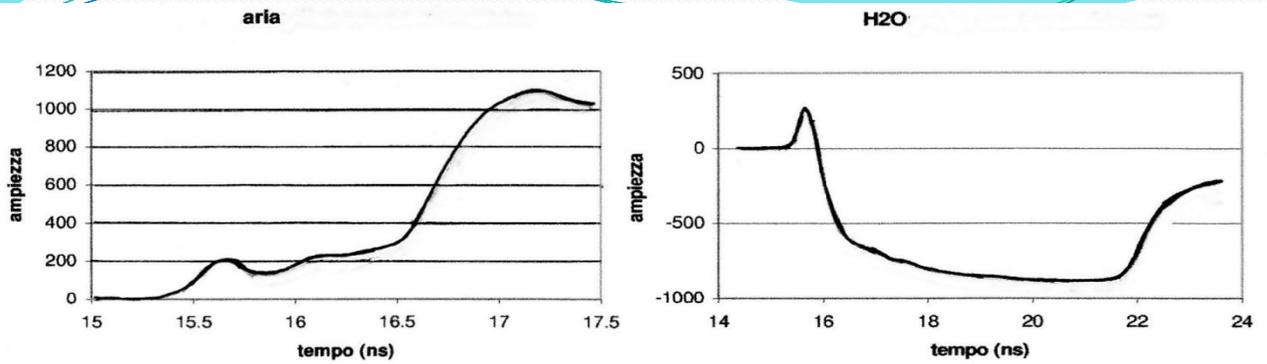
TDR 100: generatore di impulsi a gradino



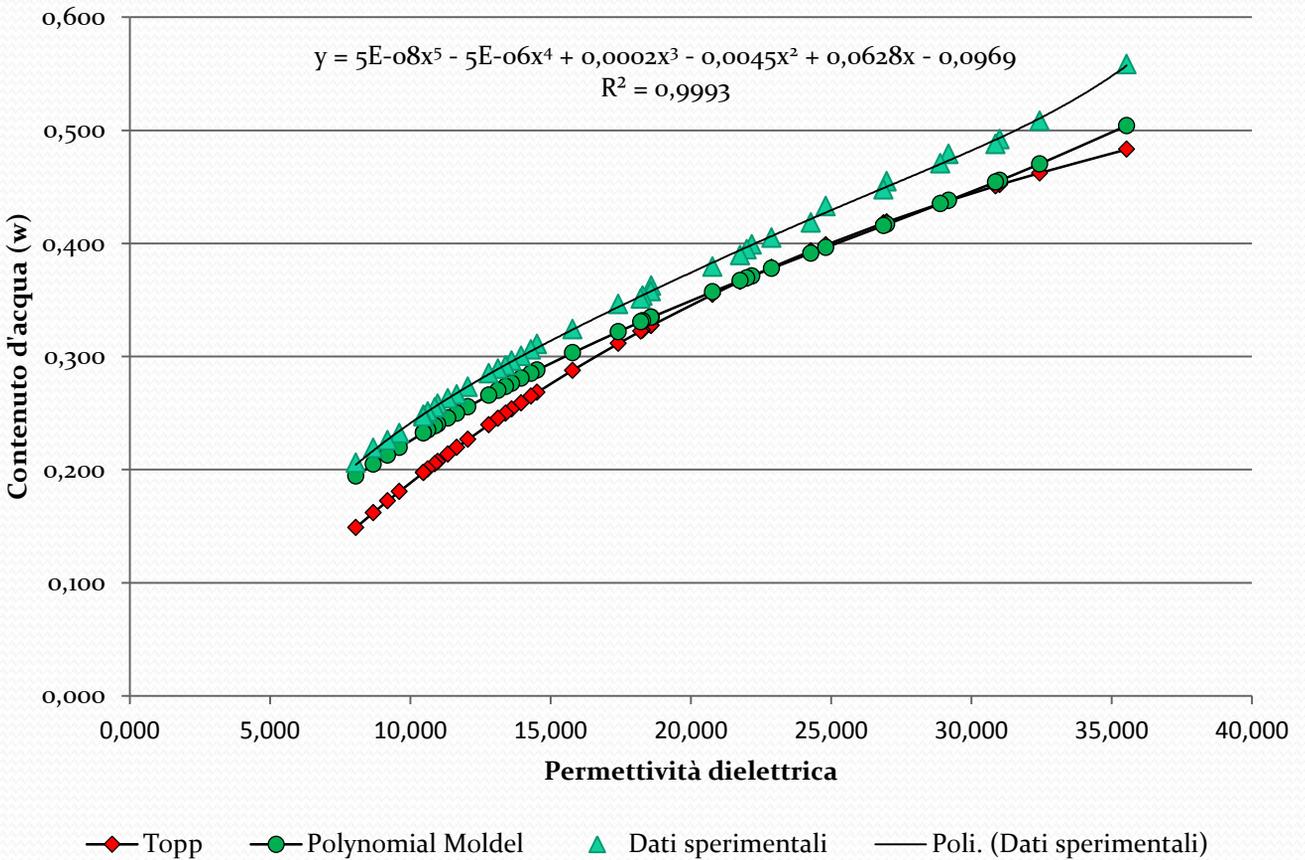
*Il numero e disposizione delle barre modifica la distribuzione del campo elettrico nell'intorno della sonda e la sensibilità della misura decresce rapidamente con la distanza dei conduttori.*

# ❖ Funzionamento





### Curve di Taratura



Correlazione tra permittività e contenuto volumetrico d'acqua secondo il modello Topp e il modello polinomiale

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} K_{app} - 5.5 \cdot 10^{-4} K_{app}^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} K_{app}^3$$

$$\theta = a + b \cdot K_a + c \cdot K_a^2 + K_a^3$$

# 6. CONCLUSIONI

1) *La strumentazione di misura è da intendersi come somma di 3 componenti:*

*1-SENSORE*

*2-CONDUTTORE*

*3-UNITÀ DI LETTURA:*

*Per una buona qualità della misura sarà quindi necessaria l'efficienza delle singole componenti*

2) *I Trasduttori di pressione forniscono una misura elettrica. Bisogna definire la curva di taratura che stabilisce la relazione tra la misura elettrica e il valore di pressione.*

*La curva di taratura può cambiare nel tempo, perciò bisogna sempre verificare la stabilità del segnale.*

3) *A tal proposito l'esperienza in laboratorio mette in evidenza che non sempre è possibile affidarsi, per tutti i terreni, alle equazioni di calibrazione presenti in letteratura (come quella di TOPP e il modello POLINOMIALE). In particolari circostanze, come in presenza di terreni piroclastici, vulcanici o con caratteristiche fisico - chimiche assai variabili è opportuno determinare comunque una nuova curva di taratura che descriva bene la relazione tra permittività dielettrica relativa e contenuto d'acqua volumetrico del terreno preso in esame.*

4) *Un'altra utilità della tecnica TDR, non trattata in questa tesi, è quella di poter calcolare la conducibilità elettrica del terreno, dell'acqua o di qualunque mezzo in cui può essere inserita la sonda. Ciò a dimostrazione delle molteplici funzioni e applicazioni a cui è diretta la tecnica TDR, non solo in campo geotecnico, ma anche idraulico, agrario ed elettrico.*



***GRAZIE PER  
L'ATTENZIONE***