Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Progettazione, sviluppo e prove di sonde capacitative per la misurazione del grado di vuoto

A. Achilli

Report RdS/2011/91

PROGETTAZIONE, SVILUPPO E PROVE DI SONDE CAPACITATIVE EPR LA MISURAZIONE DEL GRADO DI VUOTO

A. Achilli - SIET

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale
Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA

ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 051	L	1	91

Titolo

Progettazione, sviluppo e prove di sonde capacitive per la misurazione del grado di vuoto

Ente emittente SIET

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

Argomenti trattati: Reattori nucleari ad acqua
Reattori nucleari evolutivi

Sommario

Presso SIET sono stati realizzati di due prototipi di misuratore di grado di vuoto per miscele bifase (acqua aria o acqua vapore); sui di essi sono state poi eseguite prove di caratterizzazione. Il primo prototipo opera a freddo ed a bassa pressione (1 MPa, 80 °C), il secondo opera a caldo ed a pressione maggiore (1.5 MPa, 201 °C). Entrambi gli strumenti utilizzano la variazione della costante dielettrica del fluido che scorre in una tubazione per ricavare indicazioni sul grado di vuoto, sia locale che medio, all'interno della tubazione stessa. La struttura delgli strumenti permette di eseguire misure di capacità elettrica tra diversi coppie di elettrodi in modo da ricavare informazioni sul grado di vuoto dello spazio che si trova sulla linea congiungente gli elettrodi stessi e nelle immediate vicinanze. Un data logger controllato da un personale computer alimenta gli elettrodi, acquisisce i segnali e attiva le diverse coppie di elettrodi. Operando con il prototipo a freddo si è eseguita una caratterizzazione dello strumento realizzando riempimenti parziali con acqua della cella in diverse posizioni e questo ha consentito di evidenziare una discreta sensibilità dello strumento nel discriminare la presenza di acqua. Con Il prototipo operante a caldo sono state eseguite delle prove di resistenza alle condizioni operative, realizzando ciclaggi termici e di pressione per verificare l'effettivo impatto di transitori ripetuti sulla struttura dello strumento. E' stata verificato anche il funzionamento del sistema di raffreddamento dell'elettronica.

Note

Copia n. **In carico a:**

REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	16/09/2014	NOME	P. Meloni		P. Meloni
			FIRMA			

Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche Via Nino Bixio, 27/c - 29121 Piacenza (I)	**EMITTENTE** *issued by* **Unità di Produzione** **Prove Grandi Impianti**

CLIENTE: ENEA Client :	**COMMESSA:** 1PN00SMC00577 job:	**DISCO:** -- disk:	**PAGINA:** 1 **DI:** 79 page: of

IDENTIFICATIVO: **01 768 RT 11** document:	**Classe Ris.:** Confidential:	**ALLEGATI:** 3 Enclosures:

TITOLO: **Progettazione, sviluppo e prove di sonde capacitive per la misurazione del grado di vuoto**
Title:

REDATTORI: **A. Achilli**
prepared by:

LISTA DI DISTRIBUZIONE
distribution list

ENEA	Paride Meloni
SIET S.p.A.	Alfredo Luce
SIET S.p.A.	Stefano Monti
SIET S.p.A.	Andrea Achilli
SIET S.p.A.	Gustavo Cattadori
SIET S.p.A.	Stefano Gandolfi
SIET S.p.A.	Roberta Ferri
SIET S.p.A.	Cinzia Congiu

REV. Rev.	DATA date	DESCRIZIONE description	REDAZIONE prepared by	APPROVAZIONE approved by
0	12/09/2011	Emissione	A. Achilli	G.Cattadori

Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite.
Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied.

INDICE

INDICE 2
LISTA DELLE FIGURE 3
LISTA DELLE TABELLE 5
1 SCOPO 6
2 INTRODUZIONE 7
3 ASPETTI COMUNI AI PROTOTIPI A FREDDO E A CALDO 8
3.1 Aspetti teorici 8
3.2 Disposizione degli elettrodi 11
3.3 Elettronica 12
4 PROTOTIPO OPERANTE A FREDDO 15
4.1 Scopo 15
4.2 Condizioni operative e dimensionamento 15
4.3 Struttura del prototipo a freddo 16
4.4 Prove eseguite 18
4.4.1 Prove statiche 18
4.4.2 Prove con flusso bifase 19
5 RISULTATI DELLE PROVE STATICHE SUL PROTOTIPO A FREDDO 20
5.1 Sonda in verticale 20
5.2 Sonda in orizzontale 20
5.3 Ulteriori attività sperimentali di prove statiche a freddo 22
6 PROTOTIPO OPERANTE A CALDO 67
6.1 Scopo 67
6.2 Condizioni operative e dimensionamento 67
6.3 Struttura del prototipo a caldo 69
6.4 Prove eseguite 73
6.4.1 Prova idraulica del solo contenitore metallico. 73
6.4.2 Prova idraulica dello strumento allestito 73
6.4.3 Prova con vapore 73
7 RISULTATI DELLE PROVE SUL PROTOTIPO CALDO 75
7.1 Sonda senza l'elettronica 75
8 CONCLUSIONI 78
9 BIBLIOGRAFIA 79

LISTA DELLE FIGURE

Fig. 1 – Rappresentazione del dipolo elettrico 8
Fig. 2 – Condensatore cilindrico 9
Fig. 3 – Dipolo inserito in un circuito elettrico 10
Fig. 4 – Circuito elettrico equivalente 10
Fig. 5 - Schema elettrico 12
Fig. 6 - Schema di funzionamento del SAD 13
Fig. 7 - Schema a blocchi del software di gestione ed acquisizione 14
Fig. 8 - Sonda capacitiva a freddo operante in flusso bifase 17
Fig. 9 - Circuiti stampati con reed relè 18
Fig. 8 - Configurazione degli elettrodi per orientamento orizzontale della sonda capacitiva 23
Fig. 9 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 2 23
Fig. 10 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 3 24
Fig. 11 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 4 24
Fig. 12 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 5 25
Fig. 13 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 6 25
Fig. 14 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 7 26
Fig. 15 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 8 26
Fig. 16 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 9 27
Fig. 17 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 1 27
Fig. 18 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 3 28
Fig. 19 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 4 28
Fig. 20 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 5 29
Fig. 21 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 6 29
Fig. 22 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 7 30
Fig. 23 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 8 30
Fig. 24 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 9 31
Fig. 25 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 1 31
Fig. 26 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 2 32
Fig. 27 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 4 32
Fig. 28 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 5 33
Fig. 29 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 6 33
Fig. 30 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 7 34
Fig. 31 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 8 34
Fig. 32 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 9 35
Fig. 33 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 1 35
Fig. 34 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 2 36
Fig. 35 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 3 36
Fig. 36 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 5 37
Fig. 37 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 6 37
Fig. 38 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 7 38
Fig. 39 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 8 38
Fig. 40 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 9 39
Fig. 41 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 1 39
Fig. 42 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 2 40
Fig. 43 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 3 40
Fig. 44 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 4 41
Fig. 45 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 6 41
Fig. 46 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 7 42
Fig. 47 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 8 42
Fig. 48 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 9 43
Fig. 49 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 1 43
Fig. 50 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 2 44
Fig. 51 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 3 44
Fig. 52 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 4 45
Fig. 53 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 5 45
Fig. 54 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 7 46
Fig. 55 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 8 46
Fig. 56 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 9 47

Fig. 57 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 1.....47
Fig. 58 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 2.....48
Fig. 59 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 3.....48
Fig. 60 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 4.....49
Fig. 61 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 5.....49
Fig. 62 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 6.....50
Fig. 63 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 8.....50
Fig. 64 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 9.....51
Fig. 65 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 1.....51
Fig. 66 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 2.....52
Fig. 67 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 3.....52
Fig. 68 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 4.....53
Fig. 69 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 5.....53
Fig. 70 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 6.....54
Fig. 71 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 7.....54
Fig. 72 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 9.....55
Fig. 73 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 1.....55
Fig. 74 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 2.....56
Fig. 75 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 3.....56
Fig. 76 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 4.....57
Fig. 77 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 5.....57
Fig. 78 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 6.....58
Fig. 79 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 7.....58
Fig. 80 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 8.....59
Fig. 81 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 C.....59
Fig. 82 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 C.....60
Fig. 83 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 C.....60
Fig. 84 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 C.....61
Fig. 85 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 C.....61
Fig. 86 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 C.....62
Fig. 87 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 C.....62
Fig. 88 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 C.....63
Fig. 89 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 C.....63
Fig. 90 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a destra e spaziati di 22.5 °.....64
Fig. 91 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a sinistra e spaziati di 22.5 °.....64
Fig. 92 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni dell'elettrodo centrale con tre elettrodi periferici posti a 90° l'uno dall'altro.....65
Fig. 93 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di.....65
Fig. 94 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a sinistra e spaziati di 45°.....66
Fig. 95 - Scheda dati reed relè.....70
Fig. 96 - (a) Tubo in pirex montato sulla flangia inferiore, (b) Tubo in acciaio, (c) Vista dall'alto del tubo in acciaio privo della flangia superiore.....71
Fig. 97 - Strumento in fase di prova idraulica.....72
Fig. 98 - Strumento allestito ed installato sull'impianto di prova a caldo.....72
Fig. 99 – Test a caldo: Primo transitorio di temperatura e pressione.....75
Fig. 100 – Test a caldo: Secondo transitorio di temperatura e pressione.....76
Fig. 101 – Test a caldo: Terzo transitorio di temperatura e pressione.....76
Fig. 102 – Test a caldo: Quarto, quinto, sesto e settimo transitorio di temperatura e pressione.....77
Fig. 103 – Test a caldo: Ottavo transitorio di temperatura e pressione.....77

LISTA DELLE TABELLE

Tab. 1 - Verifica del tubo in plexiglass 15
Tab. 2 - Caratteristiche tecniche del plexiglass utilizzato 16
Tab. 3 - Posizione del liquido rispetto agli elettrodi 21
Tab. 4 - Verifica del tubo in pyrex 67
Tab. 5 - Caratteristiche del pyrex 68
Tab. 6 - Verifica del tubo in acciaio esterno 68
Tab. 7 - Verifica degli accoppiamenti flangiati 69
Tab. 8 - Calcolo delle superfici scambianti per il raffreddamento 74

1 SCOPO

Questo documento è relativo alla realizzazione di due prototipi di un dispositivo di misura del grado di vuoto di miscele bifase (acqua-aria o acqua-vapore) ed alle prove eseguite sui prototipi stessi.
Si tratta di strumenti basati sulla rilevazione della costante dielettrica del fluido in transito nelle tubazioni.
Il dispositivo, nella sua versione finale, è destinato all'applicazione sulle linee di rottura e sulle linee dell'ADS dell'impianto SPES3 e, unitamente ad altri strumenti, avrà l'obiettivo di misurare la portata di massa che transita nelle linee, durante i transitori incidentali.

Il documento è diviso in tre parti:

- Nella prima parte, sono ripresi gli aspetti teorici del principio di funzionamento e sono descritti gli aspetti comuni ai due prototipi.
- Nella seconda parte, si forniscono le caratteristiche e si descrive la struttura di un primo prototipo, denominato "a freddo", realizzato per operare in condizioni di bassa pressione e temperatura e si analizzano i risultati delle prove di caratterizzazione svolte su di esso.
- Nella terza parte, si forniscono le caratteristiche e si descrive la struttura di un secondo prototipo, denominato "a caldo", realizzato per operare in condizioni di elevata pressione e temperatura e si analizzano i risultati delle prove di caratterizzazione svolte su di esso.

2 INTRODUZIONE

L'impianto SPES-3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrale di reattori di piccola taglia modulari (SMR), capace di verificare la risposta del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcolo per le analisi di sicurezza.

Una caratteristica dei reattori integrati è il coinvolgimento, nel corso dei transitori incidentali, dei volumi facenti parte del contenimento che, in determinate fasi, determinano il rientro nel vessel della massa d'acqua precedentemente fuoriuscita dalla rottura.

Pertanto, per ogni transitorio previsto dalla matrice di prova, è necessaria la misura della portata massica e dell'energia scambiate tra i volumi, al fine di ricostruire il bilancio di massa nel sistema.

A causa della notevole differenza di pressione tra i circuiti primario e secondari (condizioni stazionarie nominali del primario 155 bar ed dei secondari 58 bar) ed i volumi del contenimento (condizione stazionaria iniziale pressione atmosferica), durante un transitorio di perdita di refrigerante (LOCA), si verifica la presenza di flusso bifase ad alta velocità nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Tali condotti di collegamento sono chiamati linee di rottura.

Le misure bifase sono, quindi, necessarie per ricostruire la distribuzione di massa ed energia tra i diversi componenti.

Un elemento, la cui conoscenza è necessaria per definire la portata di un flusso bifase, è il grado di vuoto di volume.

La disponibilità commerciale di strumenti per la rilevazione del grado di vuoto è risultata praticamente nulla, probabilmente per la mancanza di richiesta da parte del settore industriale. Da qui, la decisione di intraprendere lo sviluppo di un dispositivo basato sulla misura di variazione della costante dielettrica del fluido, in presenza di liquido o vapore. Tale tipologia di strumenti è stata spesso studiata a livello accademico, ma per ragioni di mercato, non si è mai concretizzata in strumenti commerciali.

I documenti [1] [2] [3] riportano la trattazione teorica di come ottenere la portata massica dai dati misurati tramite uno spool-piece e le specifiche di misura relative alle linee di rottura dell'impianto SPES-3.
Il documento [4] riporta il progetto della sonda capacitiva, sulla base del quale sono stati realizzati i prototipi descritti in questo documento con i risultati delle prove eseguite.

3 ASPETTI COMUNI AI PROTOTIPI A FREDDO E A CALDO

3.1 Aspetti teorici

La sonda capacitiva, descritta nel presente documento, utilizza la variazione della costante dielettrica del fluido, che scorre in una tubazione, per ricavare indicazioni sul grado di vuoto, sia locale che medio, all'interno della tubazione stessa. In particolare, questo strumento permette di rilevare la variazione grado di vuoto mediante la misura indiretta dell'impedenza elettrica che si manifesta al passaggio di molecole di acqua all'interno di un condotto elettricamente isolante.
Le molecole d'acqua liquida sono caratterizzate da un momento di dipolo e quindi accrescono notevolmente il valore della costante dielettrica dello spazio in cui si trovano. Il vapore è caratterizzato da una minor densità rispetto al liquido e l'agitazione molecolare ostacola l'allineamento dei dipoli [5]. Pertanto, la misura si basa sulla differenza della costante dielettrica del liquido e del vapore.
Concettualmente, la sonda è rappresentabile come un dipolo elettrico ed in particolare come un parallelo elettrico tra un "condensatore variabile" ed una "resistenza variabile", Fig. 1.

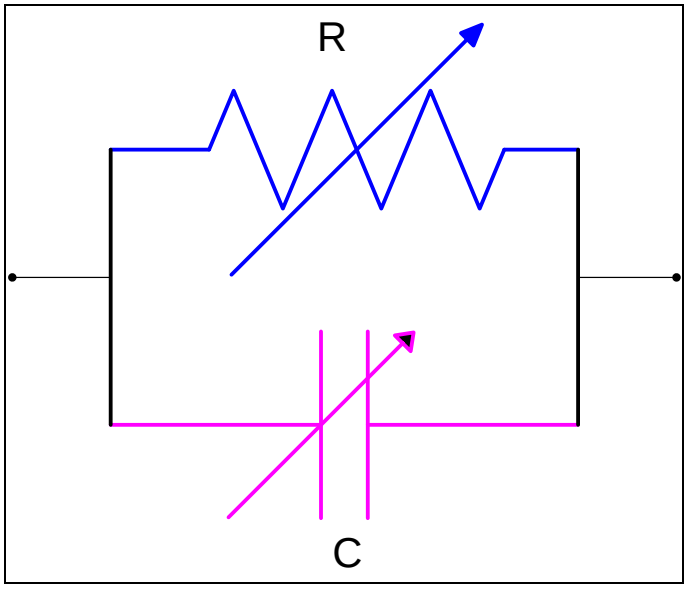


Fig. 1 – Rappresentazione del dipolo elettrico

Il condensatore è di forma cilindrica ed il dielettrico è costituito sia dal fluido contenuto nel volume interno sia dal materiale della parete di contenimento. Gli elettrodi di questo condensatore equivalente sono realizzati con una serie di lamine metalliche, applicate assialmente sulla superficie esterna del cilindro, e da un singolo conduttore posizionato all'interno del volume, coassiale al cilindro. La variazione della capacità elettrica di questo condensatore è causata dalla variazione chimica e fisica del fluido contenuto al suo interno, Fig. 2.

La serie di elettrodi, installati lungo la semicirconferenza, permette di indagare differenti sezioni di volume in funzione della coppia di elettrodi coinvolti nella misura.
La variazione chimica e fisica del fluido contenuto al suo interno determina anche la variazione di resistenza elettrica, pertanto questo dipolo, inserito in un circuito elettrico, rappresenta una impedenza ohmico-reattiva, Fig. 3.
Il circuito elettrico equivalente, considerando trascurabili le resistenze di contatto e le capacità parassite è rappresentato in Fig. 4.

Il principio di funzionamento del sistema è il seguente: il generatore sinusoidale V_{in} alimenta, attraverso l'impedenza resistivo-induttiva del secondario del trasformatore T_{in}, un partitore RLC dove viene misurata la caduta di tensione sull'impedenza del primario del trasformatore T_{out}, come mostrato dalle seguenti formule:

$$Vout = \frac{Vin}{Z_{Tin} + Z_{PROBE} + Z_{Tout}} * Z_{Tout}$$

$$Z_{Tin} = R_{Tin} + j\omega L_{Tin}$$

$$Z_{Tout} = R_{Tout} + j\omega L_{Tout}$$

$$Z_{PROBE} = \frac{R_{PROBE} * \frac{1}{j\omega C_{PROBE}}}{R_{PROBE} + \frac{1}{j\omega C_{PROBE}}}$$

$$\omega = 2 * \pi * f$$

$$f = 2500Hz$$

$$Vin = 10Vpp$$

Il documento [4] descrive in modo dettagliato le considerazioni teoriche che hanno portato alla definizione della struttura del prototipo.

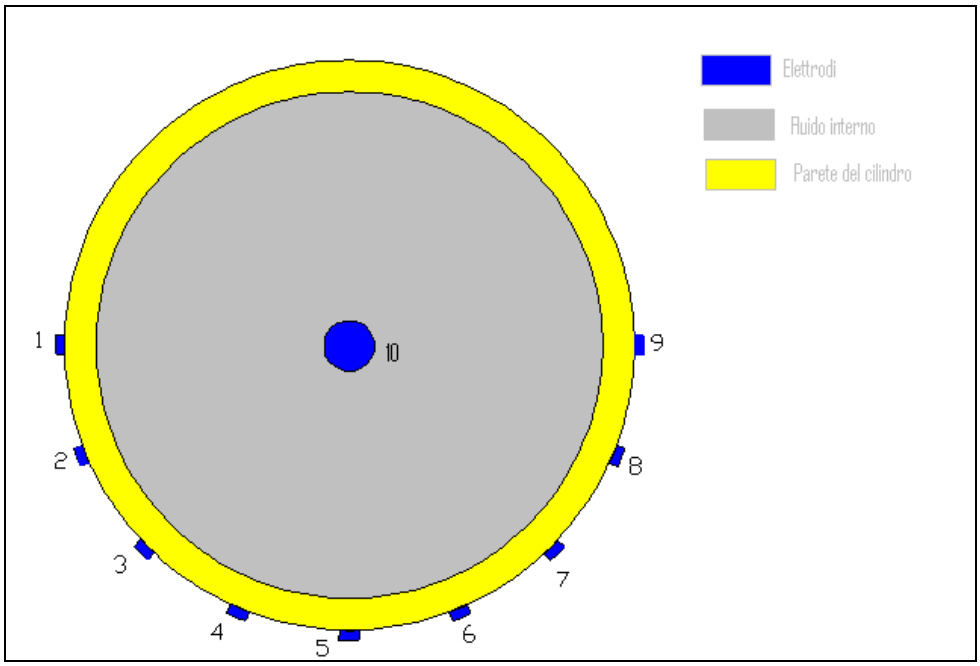
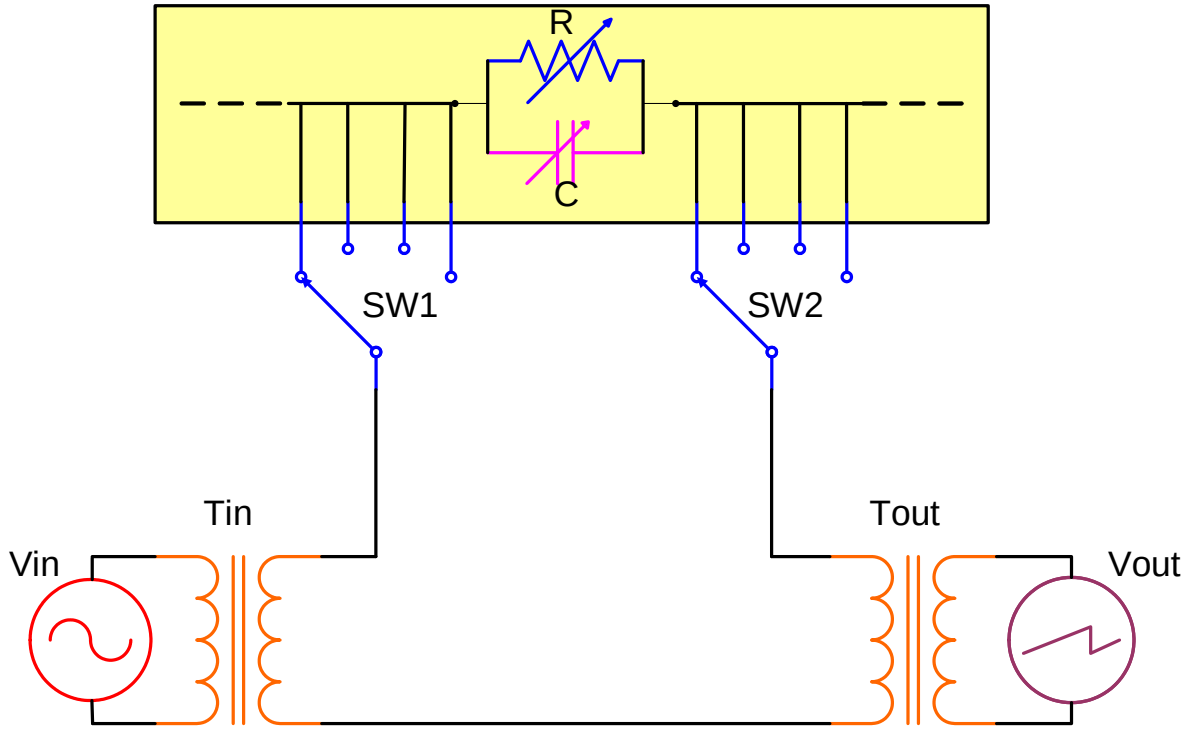


Fig. 2 – Condensatore cilindrico



Vin senale di eccitazione
Vout segnale di uscita
Tintrasformatore di accoppiamento
Tout trasformatore di disaccoppiamento
SW1 multiplexer 9 canali
SW2 multiplexer 10 canali
R-C sonda di misura

Fig. 3 – Dipolo inserito in un circuito elettrico

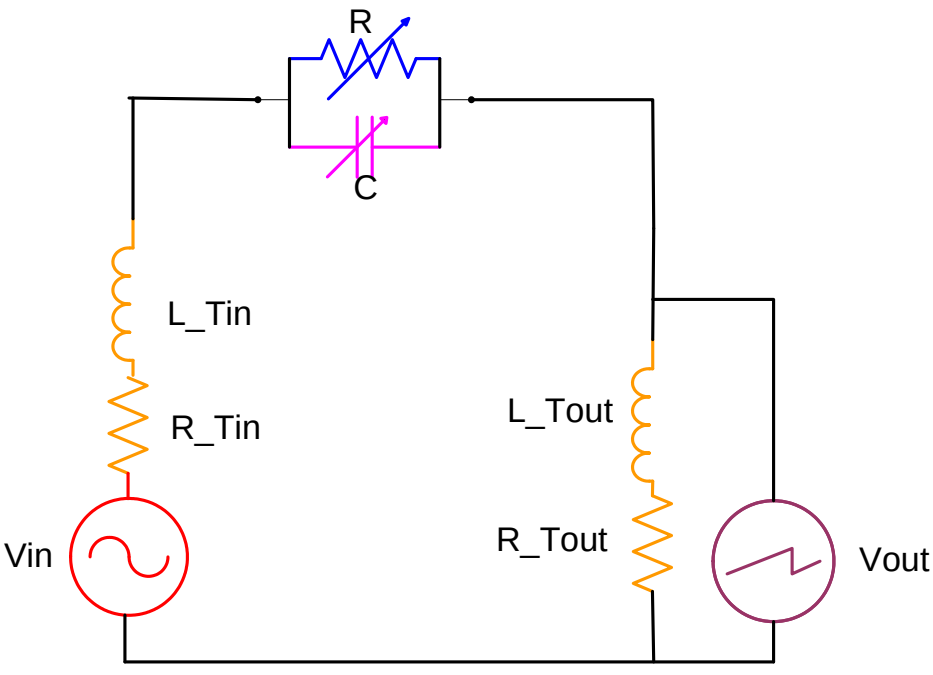


Fig. 4 – Circuito elettrico equivalente

3.2 Disposizione degli elettrodi

I principali requisiti degli elettrodi sono elencati di seguito e si basano su quanto specificato nel documento [4]:

- essi devono avere una superficie sufficientemente grande per essere sensibili alle variazioni di costante dielettrica del fluido, nello spazio compreso tra di loro, rispetto al disturbo dovuto a variazioni della costante dielettrica in altre parti dello strumento;
- è necessario che gli elettrodi siano prevalentemente esterni al tubo in materiale isolante, per semplificare il sistema di posa;
- è necessario che vi siano numerosi elettrodi intorno al tubo, in modo da consentire una risoluzione significativa per quanto riguarda la ricostruzione del grado di vuoto e i regimi di flusso entro la sezione.

La distribuzione, che soddisfa tutti i requisiti suddetti, è rappresentata da elettrodi lineari, realizzati con nastri metallici di larghezza limitata e di lunghezza significativa o con conduttori a sezione circolare, disposti lungo le generatrici di un tubo in materiale isolante, che costituisce il tronchetto di misura vero e proprio.

Oltre agli elettrodi esterni, per alcuni tipi di moto, è utile un elettrodo interno alla tubazione, disposto in coincidenza del diametro e realizzato con una bacchetta metallica supportata da crociere d'estremità.

La disposizione longitudinale degli elettrodi è stata scelta per avere una adeguata superficie sensibile dell'elettrodo stesso, in previsione degli elevati gradi di vuoto da misurare, che, in tubazioni orizzontali, danno luogo a moti prevalentemente costanti nel tempo e privi di discontinuità, come slug o bolle.

La struttura consente di eseguire misure di capacità elettrica tra ciascuna coppia di elettrodi, in modo da ricavare informazioni sul grado di vuoto dello spazio che si trova tra gli elettrodi e nelle immediate vicinanze.

La struttura con elettrodi longitudinali è utilizzata sia per il prototipo "a freddo" che per quello "a caldo".
Il prototipo a freddo (per misure con miscela bifase acqua-aria) presenta elettrodi su metà circonferenza, perché la fase operativa di caratterizzazione a freddo è stata realizzata prevalentemente con flussi assiali simmetrici in tubazioni verticali ascendenti.
Il prototipo a caldo (per misure con miscela bifase acqua-vapore) presenta elettrodi lungo l'intera circonferenza, in quanto è concepito per l'installazione su tubi orizzontali e quindi in presenza di flussi bifase asimmetrici, a causa dell'azione della forza di gravità.

I disegni 077.00.00 Rev.0 dell'Allegato 2 e 077.01.00/1 e 077.01.00/2 Rev.1 dell'Allegato 3 mostrano le sezione dei due dispositivi a freddo e a caldo, con la disposizione degli elettrodi. Il prototipo a freddo presenta 9 elettrodi, distanziati angolarmente di 22.5°, più un elettrodo centrale. Il prototipo a caldo ne presenta 16, anch'essi distanziati angolarmente di 22.5° e distribuiti su tutta la circonferenza.

3.3 Elettronica

I due prototipi, oltre ad avere una struttura degli elettrodi molto simile, hanno in comune anche la parte elettronica, circuitale e la geometria interna.
Il disegno in Fig. 5 riporta lo schema elettrico del prototipo a freddo (9 elettrodi circonferenziali + 1 centrale) con cui la cella di misura è collegata ai circuiti del SAD (Sistema Acquisizione Dati).

Il sistema è basato su un SAD in grado di assolvere la doppia funzione di generazione del segnale ad alta frequenza e di misura del segnale di ritorno. Il dispositivo, di produzione National Instruments, è pilotato con un software scritto in Labview, specifico per la sonda capacitiva.

La scheda con il relativo software provvede a tre importanti funzioni:

1. **Generazione della tensione di alimentazione:** l'unità genera tensioni continue o alternate, di frequenza, forma d'onda o tensione stabilite dall'utente. In questo caso genera il segnale $V_{in,}$ Fig. 6, di eccitazione della coppia di elettrodi coinvolti nella misura. Per tutte le prove eseguite sui prototipi, l'energizzazione è stata mantenuta ad un valore di tensione RMS di 5 Vac con una frequenza di 25 kHz.

2. **Lettura del segnale:** l'unità legge il segnale $V_{out,}$ Fig. 6, ad alta frequenza, di ritorno dalla cella di misura, campionandolo ad una frequenza superiore a quella del segnale stesso. Per tutte le prove si è adottata una frequenza di campionamento di 250 kHz, dieci volte superiore a quella del segnale di energizzazione, in modo da evitare fenomeni di distorsione (aliasing).

3. **Comando degli elettrodi:** l'unità è in grado di generare in uscita tensioni continue di 5 Vdc. A seconda delle sequenze di prova, implementate nel software, tali uscite consentono di comandare la chiusura dei relè miniaturizzati che attivano le diverse coppie di elettrodi.

Lo schema di funzionamento del SAD è mostrato in Fig. 6.

L'hardware del sistema è costituito dai seguenti componenti:
- una scheda di acquisizione multifunzione USB-6259 (National Instruments) (Allegato 1);
- due banchi di reed relè alloggiati su due circuiti stampati;
- una scheda millefori su cui sono alloggiati ed elettricamente cablati i trasformatori ed i connettori di collegamento.

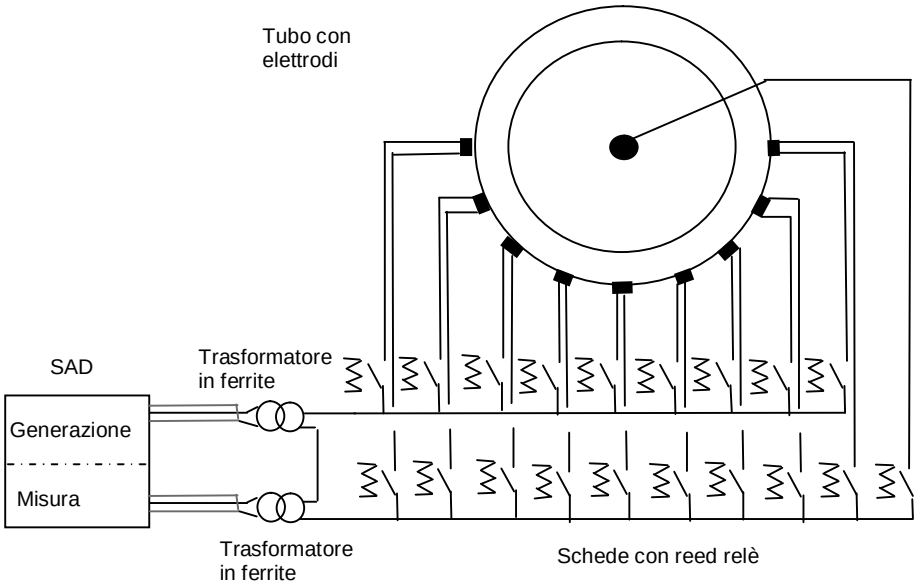


Fig. 5 - Schema elettrico

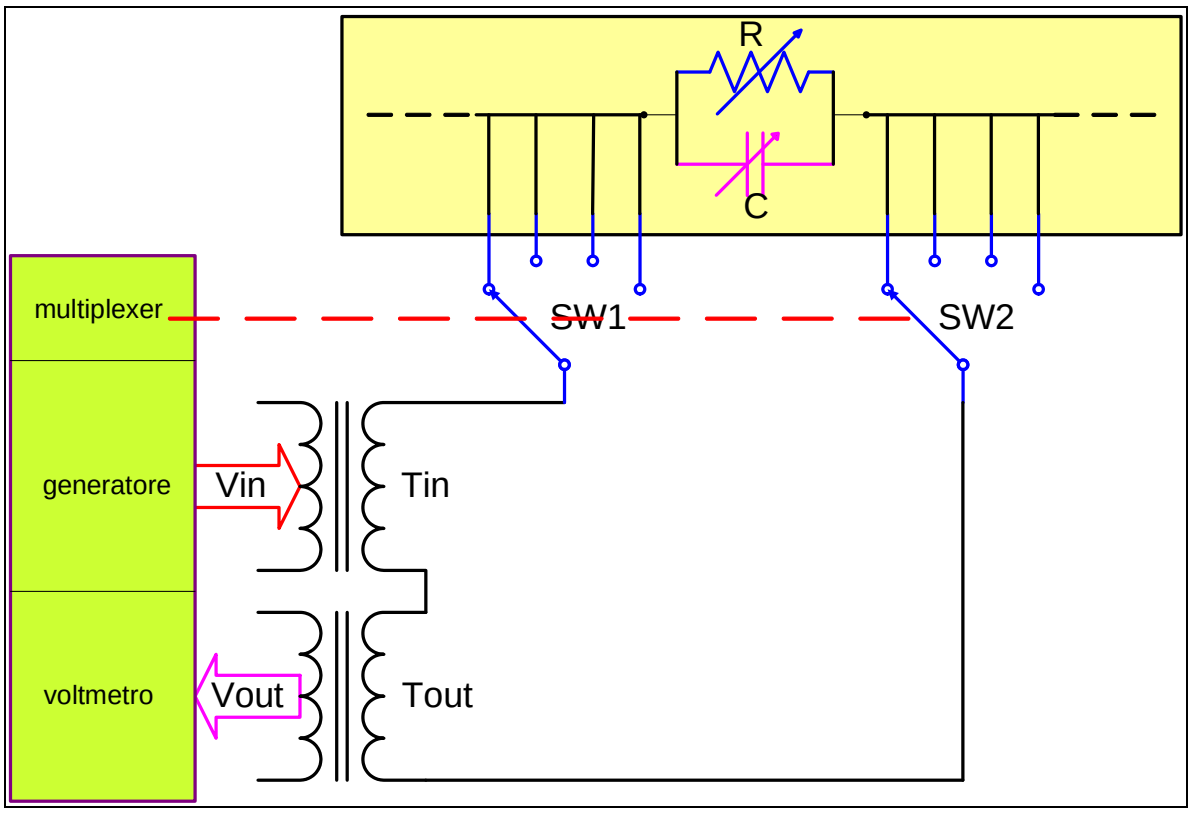


Fig. 6 - Schema di funzionamento del SAD

Il software è costituito da due programmi, realizzati da SIET in linguaggio Labview (National Instruments). Il primo programma esegue la generazione del segnale sinusoidale V_{in}, pilotando il canale Analog Output 0 della scheda USB-6259. Il secondo programma pilota i due banchi di switch, sia in modalità manuale sia automatica, utilizzando i canali di uscita digitale disponibili sulla scheda USB-6259. Questo secondo programma legge il segnale V_{out} collegato al canale Analog Input 0 della scheda USB-6259.

La Fig. 7 riporta lo schemi a blocchi del software operativo.

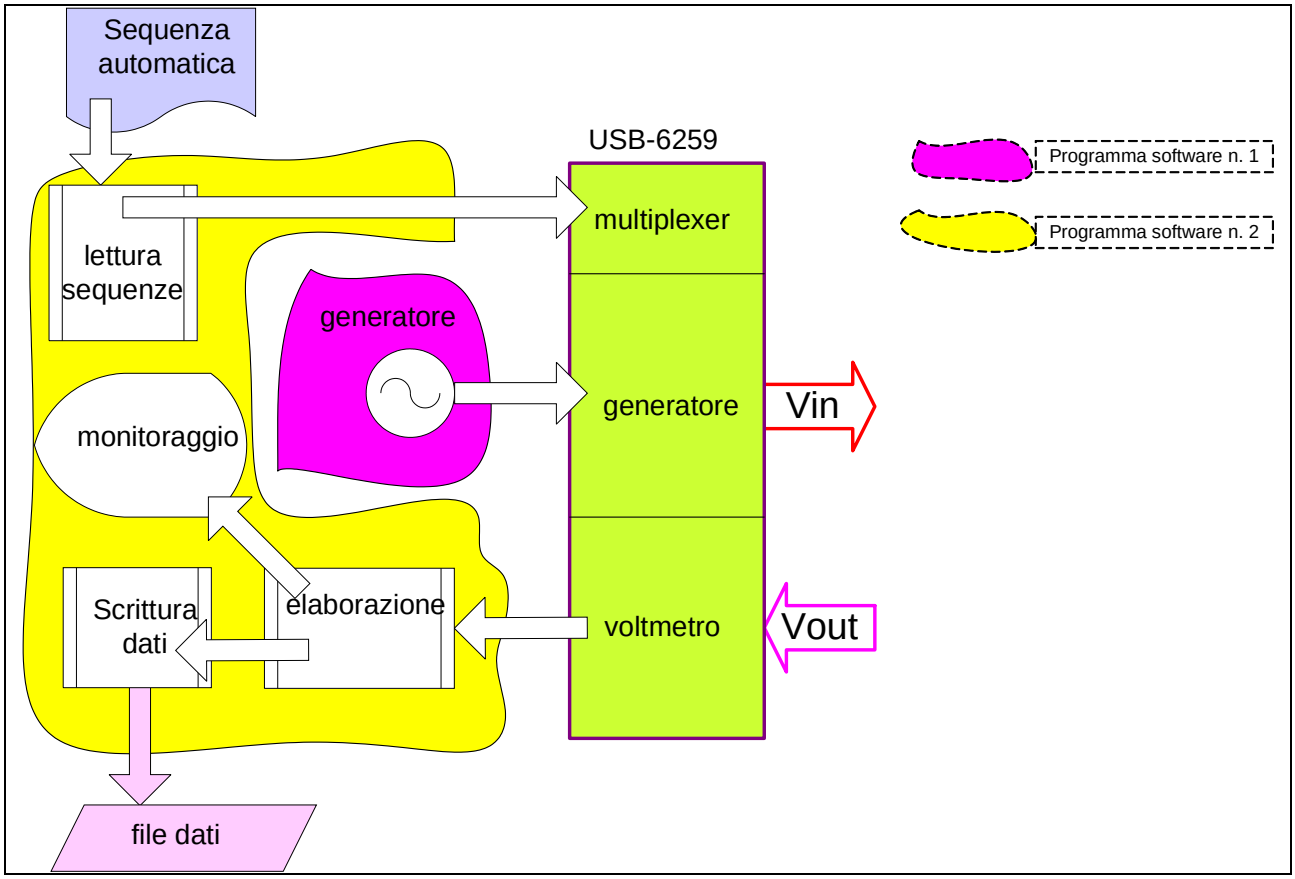


Fig. 7 - Schema a blocchi del software di gestione ed acquisizione

4 PROTOTIPO OPERANTE A FREDDO

4.1 Scopo

Il prototipo operante a freddo è stato realizzato per mettere a punto la tecnologia, utilizzando fluidi di prova come aria compressa e vapore a pressione atmosferica.

4.2 Condizioni operative e dimensionamento

Le condizioni di progetto del prototipo operante a freddo sono le seguenti:

Pressione massima 10 bar (relativi)
Temperatura massima 80 °C

I limiti sulle condizioni operative sono dettati dalla tubazione in plexiglass che costituisce il tubo in materiale isolante esternamente al quale sono fissati gli elettrodi.

In Tab. 1 sono riassunti i risultati della verifica strutturale a pressione interna del tubo in plexiglass, partendo dal valore della resistenza a trazione riportata in Tab. 2.

Tab. 1 - Verifica del tubo in plexiglass

Resistenza a trazione (a rottura)	73	MPa
Resistenza a trazione (a rottura)	73	N/mm^2
coefficiente di riduzione	4	
Trazione ammissibile	18.25	N/mm^2
Pressione massima d'esercizio	10	bar
Pressione di prova idraulica	15	bar
Diametro (esterno)	90	mm
Spessore	5	mm
Sollecitazione unitaria	13.5	N/mm^2
Confronto tra trazione ammissibile e sollecitazione unitaria	Positivo	

Tab. 2 - Caratteristiche tecniche del plexiglass utilizzato

	PROPRIETA'	NORME	UN.MIS.	VALORI
PROPRIETA'	Densità	ISO 1183		1,19
GENERALI	Assorbimento d'acqua	ISO 62	%	0,2
PROPRIETA'	Resistenza a trazione	ISO 527	MPa	73
MECCANICHE	Modulo elastico a trazione	ISO 527	MPa	3060
	Allungamento a rottura	ISO 527	%	4,9
	Resistenza a flessione	ISO 178	MPa	110
	Modulo elastico a flessione	ISO 178	MPa	3000
	Durezza Rockwell	ISO D 2039		90
	Resistenza a compressione	ISO 604	MPa	110
PROPRIETA'	Trasmissione della luce	ISO 3557	%	91
OTTICHE	Trasmissione della luce (420nm)	ISO 3557	%	91
	Indice di rifrazione	ISO 489		1,49
PROPRIETA' ELETTRICHE	Rigidità dielettrica	DIN 53481	KV/mm	20 A 25
PROPRIETA'	Coeff. di dilatazione lineare	ASTM D696	Mm/m°C	0,08
TERMICHE	Conducibilità termica	DIN 52612	W/m°C	0,19
	Temperatura di rammollimento Vicat	ISO 306 (B7)	°C	105
	HDT	ISO 75/A	°C	102
	Temp. massima di esercizio		°C	80
	Temp. del forno di riscaldamento		°C	140 - 150
	Temp. max. di riscaldamento		°C	180
	Ritiro lineare max. dopo riscaldamento (spess.>3mm)		%	2
	Temp. superficiale max. per pannelli a raggi infrarossi		°C	205

4.3 Struttura del prototipo a freddo

Il disegno 077.00.00 rev.0 dell'Allegato 2 riporta la struttura del prototipo a freddo. In particolare sono visibili:

- il tubo principale in plexiglass che supporta gli elettrodi;
- il tubo ausiliario in plexiglass che consente l'isolamento del tratto centrale;
- l'elettrodo centrale con l'anello metallico che ne consente il supporto e la connessione elettrica;
- i tratti di raccordo con le flange terminali e le flange utilizzate per il bloccaggio meccanico dell'insieme;
- i tiranti che accoppiano le flange per il bloccaggio meccanico.

La struttura proposta consente di garantire la tenuta tra il tubo in plexiglass e le parti metalliche, mediante guarnizioni piane compresse dal serraggio dei tiranti. Gli stessi tiranti sono utilizzati per supportare i circuiti stampati che consentono il collegamento tra il SAD e gli elettrodi.

La Fig. 8 mostra la sonda durante il funzionamento con flusso bifase ascendente, installata presso il DENER del Politecnico di Torino. Gli anelli bianchi e neri che circondano il tubo mantengono in posizione gli elettrodi verticali costituiti da lamine d'alluminio di 1 mm di spessore e 3 mm di larghezza.

La Fig. 9 mostra i circuiti stampati con i reed relè utilizzati per il prototipo a freddo.

Fig. 8 - Sonda capacitiva a freddo operante in flusso bifase

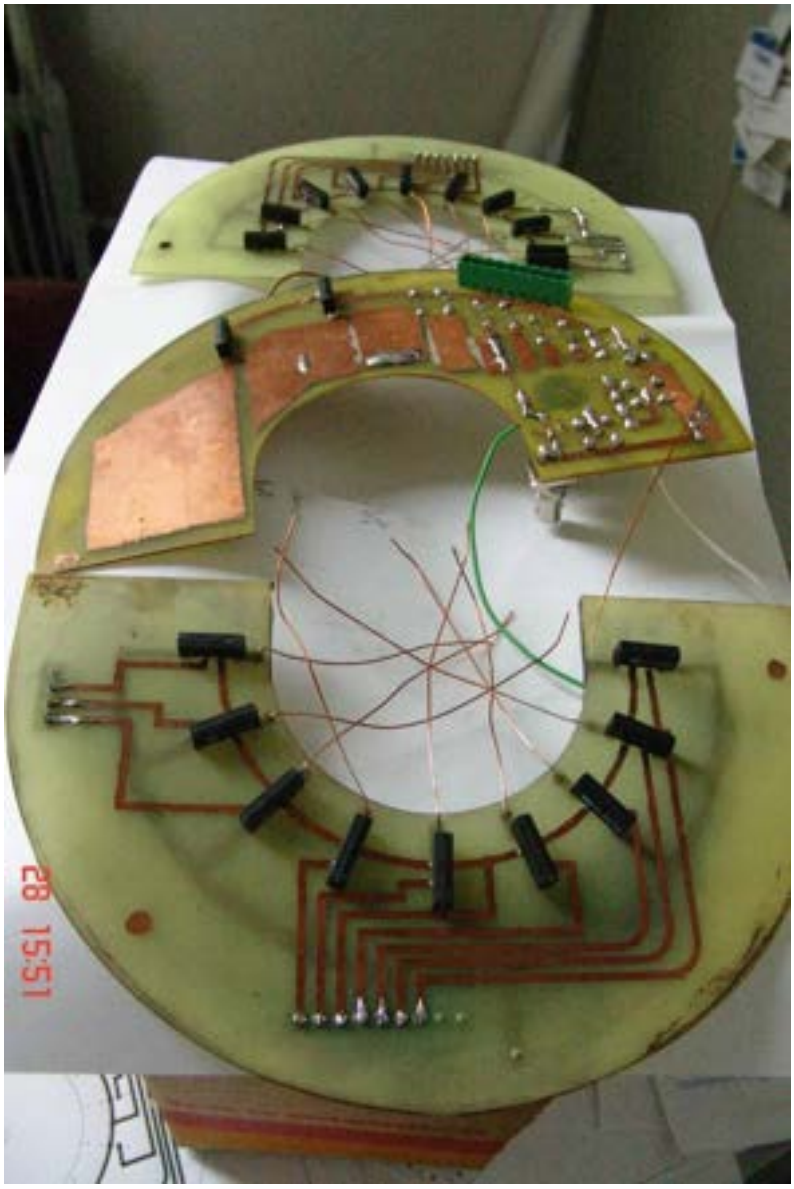


Fig. 9 - Circuiti stampati con reed relè

4.4 Prove eseguite

Il prototipo a freddo è stato provato sia presso i laboratori della SIET sia presso i laboratori del Dipartimento di Energetica (DENER) del Politecnico di Torino con lo scopo principale di verificare la tecnologia sviluppata.

4.4.1 Prove statiche

Le prove statiche sono finalizzate a ricostruire la risposta della sonda in situazioni in cui sia presente all'interno di essa una quantità nota di liquido, sovrastata da aria a condizioni atmosferiche.
In particolare, la sonda è stata posizionata verticalmente dopo averne tappato l'estremità inferiore, ed è stata progressivamente riempita con acqua fino a coprire totalmente la zona caratterizzata dalla presenza degli elettrodi. La prova è stata ripetuta anche in posizione orizzontale con un'estremità tappata e con l'altra dotata di una flangia di chiusura collegata a piccole linee ausiliarie per il riempimento e lo svuotamento. Le prove statiche con la sonda in entrambe le posizioni, verticale ed orizzontale, sono state eseguite presso i laboratori della SIET.

Le prove in verticale, eseguite alla SIET, sono servite principalmente per la messa a punto del sistema. Essendo state successivamente ripetute ed approfondite al Politecnico di Torino, i loro risultati non sono dettagliati in questo documento.

I risultati delle prove statiche in orizzontale sono invece descritti nel Cap. 5.

Le prove statiche, effettuate presso il DENER del Politecnico di Torino, ed i relativi risultati sono riportati nel documento [6].

Per prove statiche in condizioni simili, sono stati confrontati i segnali registrati presso la SIET e il DENER. È stata riscontrata una differenza di ampiezza del segnale imputabile alla sostituzione di componenti, quali i cavi di collegamento tra la scheda di acquisizione NI-6259 e la sonda capacitiva e i cavi di collegamento dei circuiti elettronici, in particolare, i cavi che si dipartono dai trasformatori in ferrite fino al lato comune degli elettrodi sui circuiti stampati.
Dal confronto, si è capito che, per ciascun assetto di prova, è necessario operare una calibrazione del sistema in condizioni di tutto vuoto e tutto pieno, per definire il range di variazione del segnale in uscita.

4.4.2 Prove con flusso bifase

Il prototipo a freddo è stato provato in condizioni di flusso bifase acqua-aria presso il Politecnico di Torino, utilizzando un circuito a pressione atmosferica, disponibile nei laboratori del DENER. Il prototipo è stato sottoposto a flussaggio con portate note di aria ed acqua, ossia a diversi titoli in ingresso. In condizioni di regimi di moto stazionari, il grado di vuoto medio di sezione è stato misurato tramite l'utilizzo di valvole rapide istallate sul circuito. I risultati di questa campagna sperimentale sono riportati nel documento [6] ed hanno consentito al Dipartimento di Energetica di studiare il legame tra il segnale di uscita (Volt) ed il grado di vuoto, per definire delle funzioni di correlazione.

5 RISULTATI DELLE PROVE STATICHE SUL PROTOTIPO A FREDDO

5.1 Sonda in verticale

Le prove eseguite sulla sonda capacitiva, in posizione verticale, sono servite principalmente alla messa a punto del sistema hardware. Particolari disturbi del segnale acquisito hanno portato alla sostituzione e modifica di alcuni componenti elettrici, in particolare:

- la sostituzione dei connettori tra elettrodi e scheda di acquisizione;
- la resinatura delle schede con i circuiti stampati per migliorarne l'isolamento;
- la sostituzione delle basette dei trasformatori in ferrite a causa di saldature fredde difettose.

In questo documento non sono riportati i risultati delle prove in verticale, perché poco significativi ai fini della misura del grado di vuoto e soprattutto perché il Politecnico di Torino ha effettuato prove nella configurazione verticale in modo strutturato ed approfondito [6].

5.2 Sonda in orizzontale

Possibili condizioni, che si possono verificare nelle linee dell'impianto SPES-3, sono rappresentate da moti stratificati, caratterizzati dalla presenza di liquido nella parte inferiore dalla tubazione. Questi moti sono determinati principalmente dalla configurazione orizzontale delle linee e si verificano in concomitanza di situazioni di bassa portata o di riflusso dal contenimento al vessel.

L'indagine delle configurazioni stratificate orizzontali è complementare ai test statici e con flusso, eseguiti presso il Politecnico di Torino, il cui impianto, per ora, ha la possibilità di operare solo con la linea DN80 e la sonda collocata in verticale con flusso ascendente [6].

Alla SIET, le prove statiche, con asse della sonda orizzontale, sono state eseguite con acqua demineralizzata avente conduttività elettrica variabile da 4 a 6 µS/cm. La scelta di utilizzare acqua demineralizzata è stata fatta a valle dell'esecuzione di alcune prove preliminari con acqua di rete. La conduttività dell'acqua di rete è elevata ed è circa 40 µS/cm. Ciò influenza il segnale di uscita della sonda con un effetto di saturazione.

Per eseguire le prove, la sonda è stata disposta in orizzontale con le estremità tappate. Attraverso una piccola linea ausiliaria è stata iniettata, a più riprese, acqua demineralizzata, misurando ogni aggiunta mediante un cilindro graduato.

In questo modo si sono realizzate diverse condizioni di riempimento parziale, a livello noto. Il livello raggiunto ad ogni step della prova è stato determinato calcolando, a partire dal volume di liquido immesso, l'altezza del solido avente sezione a segmento circolare, occupato dal liquido stesso.

Ad ogni valore di livello, sono state eseguite acquisizioni dei segnali provenienti dalla sonda, della durata di circa 1 minuto, raccogliendo più volte per ogni acquisizione, i valori di segnale associato a tutte le combinazioni di elettrodi.

Il riempimento progressivo e le relative acquisizioni sono proseguiti fino a raggiungere un livello di poco superiore alla quota dell'asse del tubo.

La Fig. 10 riproduce i livelli realizzati. Si tratta di nove diversi livelli nel range 10.7 – 43.59 mm.

La Tab. 3 riporta la posizione verticale, rispetto agli elettrodi, dei diversi livelli di liquido realizzati.

La sezione del tubo in plexiglass in Fig. 10, oltre a riportare i livelli di liquido a cui sono state eseguite le diverse prove, mostra la disposizione degli elettrodi lungo la circonferenza e l'elettrodo centrale.

Per ciascun livello di liquido, gli elettrodi sono stati eccitati a coppie ed il segnale di uscita registrato dal SAD. Per ogni coppia di elettrodi attivati, sono state eseguite alcune decine di misurazioni (20-30) ed i singoli valori sono stati sottoposti all'operazione di media aritmetica. Le figure da Fig. 11 a Fig. 91 riportano i valori del segnale (potenziale elettrico in Volt) per le varie combinazioni di elettrodi, al variare del livello. Oltre ai valori medi, sono riportati i valori minimi e massimi acquisiti. In tal modo si ha una rappresentazione grafica della ripetibilità del segnale.

Tab. 3 - Posizione del liquido rispetto agli elettrodi

Livello [mm]	posizione rispetto agli elettrodi
10.7	Coincide con gli elettrodi 3 e 7
17.3	E' intermedio tra gli elettrodi 2-3 e 7-8
23.6	E' intermedio tra gli elettrodi 2-3 e 7-8, ma più vicino agli elettrodi superiori 2 ed 8
25.78	E' intermedio agli elettrodi 1-2 e 8-9, ma vicino agli elettrodi inferiori 2 e 8
28.42	E' intermedio agli elettrodi 1-2 e 8-9, ma vicino agli elettrodi inferiori 2 e 8
30.11	E' intermedio agli elettrodi 1-2 e 8-9
33.56	E' intermedio agli elettrodi 1-2 e 8-9
38.58	E' intermedio agli elettrodi 1-2 e 8-9, ma vicino agli elettrodi superiori 1 e 9
43.59	E' superiore agli elettrodi 1 e 9

Dai grafici relativi a tutte le combinazioni di elettrodi, da Fig. 11 a Fig. 91, si possono fare due osservazioni:

- Per tutte le coppie di elettrodi, il segnale varia in modo monotono, crescente con l'aumento di livello;
- Il rapporto segnale/disturbo è quasi sempre molto contenuto, e ciò è evidenziato dalla limitata dispersione verticale dei minimi e dei massimi, rispetto ai valori medi. Ci sono però alcune combinazioni di elettrodi quali ad esempio la combinazione 1-9, Fig. 18, e buona parte delle combinazioni che vedono coinvolto l'elettrodo 2, da Fig. 20 a Fig. 26, che presentano una maggior dispersione dei massimi e minimi.

Si ipotizza che quest'ultimo aspetto sia dovuto a residui problemi di cablaggio elettrico o a saldature fredde delle terminazioni degli elettrodi coinvolti. Questa relativa maggiore rumorosità non rappresenta comunque un problema nella fase di caratterizzazione del prototipo, grazie al fatto che si opera su segnali medi.

Per ottenere indicazioni su quanto la risposta degli elettrodi vari in funzione della loro posizione, rispetto alla generatrice inferiore del tubo, sono stati comparati i segnali provenienti da diverse coppie di elettrodi, posizionate a diverse distanze verticali da tale generatrice. I risultati delle comparazioni sono riportati, sotto forma grafica, nelle figure da Fig. 92 a Fig. 96.

Le Fig. 92 e Fig. 93 riportano l'andamento del potenziale per le diverse coppie di elettrodi, tra loro adiacenti (spaziati di 22.5°), posti a destra e a sinistra del piano di simmetria verticale, passante per l'asse della tubazione. In linea teorica, le quattro curve di Fig. 92, per ragioni di simmetria, dovrebbero essere simili alle analoghe curve di Fig. 93. In realtà, vi sono alcune differenze apprezzabili. La maggiore differenza è una anomalia del segnale degli elettrodi 4,3 in Fig. 93 rispetto agli elettrodi corrispondenti 6-7 in Fig. 92 (nota (1) in Fig. 93).

Un andamento congruente con gli aspetti fisici coinvolti, ossia con l'aumento di livello nella sezione di prova, è il ritardo con cui gli elettrodi più alti, 1-2 e 8-9, mostravo variazione di segnale (nota (2) in Fig. 92 e nota (3) in Fig. 93).

Infine, la risposta dell'elettrodo centrale, operante in coppia con tre elettrodi periferici, Fig. 94, evidenzia che le coppie 1-C e 9-C, se si eccettua uno shift causato probabilmente da differenze nei circuiti elettrici, manifestano un andamento simile in termini di pendenza e differenza tra valore iniziale e finale. Ciò, a conferma del fatto che si tratta di coppie simmetriche. La coppia 5-C mostra una dinamica inferiore, ma comunque congruente con la crescita del livello di liquido nello spazio compreso tra gli elettrodi.

L'ultima valutazione riguarda l'andamento dei segnali di coppie di elettrodi spaziati di 45°. Il grafico di Fig. 95 riporta le coppie di elettrodi 5-7, 6-8, 7-9 situate a destra rispetto al piano di simmetria verticale. Il grafico di Fig. 96 riporta l'andamento dei segnali per le coppie 5-3, 4-2, 3-1 situate a sinistra del piano di simmetria verticale.

E' immediatamente verificabile una sostanziale similitudine di forma delle curve corrispondenti. La curva degli elettrodi 6,8, in Fig. 95, risulta più elevata della corrispondente curva degli elettrodi 4,2, in Fig. 96. Si ricorda che il posizionamento verticale delle curve può non coincidere, a causa di effetti elettrici sistematici su alcuni elettrodi. Più importante è la forma che è legata alla variazione relativa di segnale.

E' poi evidente la traslazione verso destra delle curve degli elettrodi più alti, 7-9 e 3-1, congruente con il fatto che essi sono interessati dalla presenza di liquido, nelle loro zona di sensibilità, solo per livelli superiori (nota (4) in Fig. 96).

5.3 Ulteriori attività sperimentali di prove statiche a freddo

La sonda a freddo ha evidenziato una buon legame tra i valori dei segnali provenienti dagli elettrodi e la presenza di acqua liquida nella zona di sensibilità degli stessi.

Dopo una fase iniziale, qui non descritta, caratterizzata da prove preliminari affette da rumorosità di fondo, sono stati effettuati interventi di miglioramento e modifica dei cablaggi elettrici. Ciò ha consentito di portare a bassi livelli il livello di rumorosità di segnale, all'interno delle singole acquisizioni, come evidenziato nei grafici da Fig. 11 a Fig. 91.

Si suppone che vi siano ancora dei fenomeni di lenta deriva del segnale, dovuti a fattori fisici ambientali (umidità e temperatura) e elettromeccanici (sollecitazione meccanica sulle connessioni in alta frequenza). Questi fenomeni possono essere alla base delle anomalie di forma di alcune curve, anomalie messe in evidenza nel paragrafo precedente.

E' quindi opportuno pianificare una ulteriore serie di test statici, sulla sonda in posizione orizzontale, realizzati in ambiente sottoposto a monitoraggio dei parametri ambientali. Questa campagna dovrà prevedere numerose ripetizioni delle configurazioni di prova, effettuate a distanza di tempo (almeno qualche ora) per valutare meglio l'effettiva entità delle derive di segnale.

Durante questa nuova serie di test, saranno effettuati anche test a livelli bassi (inferiori a 10 mm) per caratterizzare meglio la risposta degli elettrodi inferiori.

Pur essendo sempre effettuata con acqua fredda, a pressione atmosferica, la fase sperimentale statica aggiuntiva potrà, con maggior benefici, essere effettuata sul prototipo realizzato per operare a caldo. Siccome lo strumento dispone di una corona di 16 elettrodi che circondano totalmente la tubazione (contro i 9 del prototipo a freddo), ciò accrescerà il livello di informazione disponibile, specialmente sulle situazioni di moto stratificato.

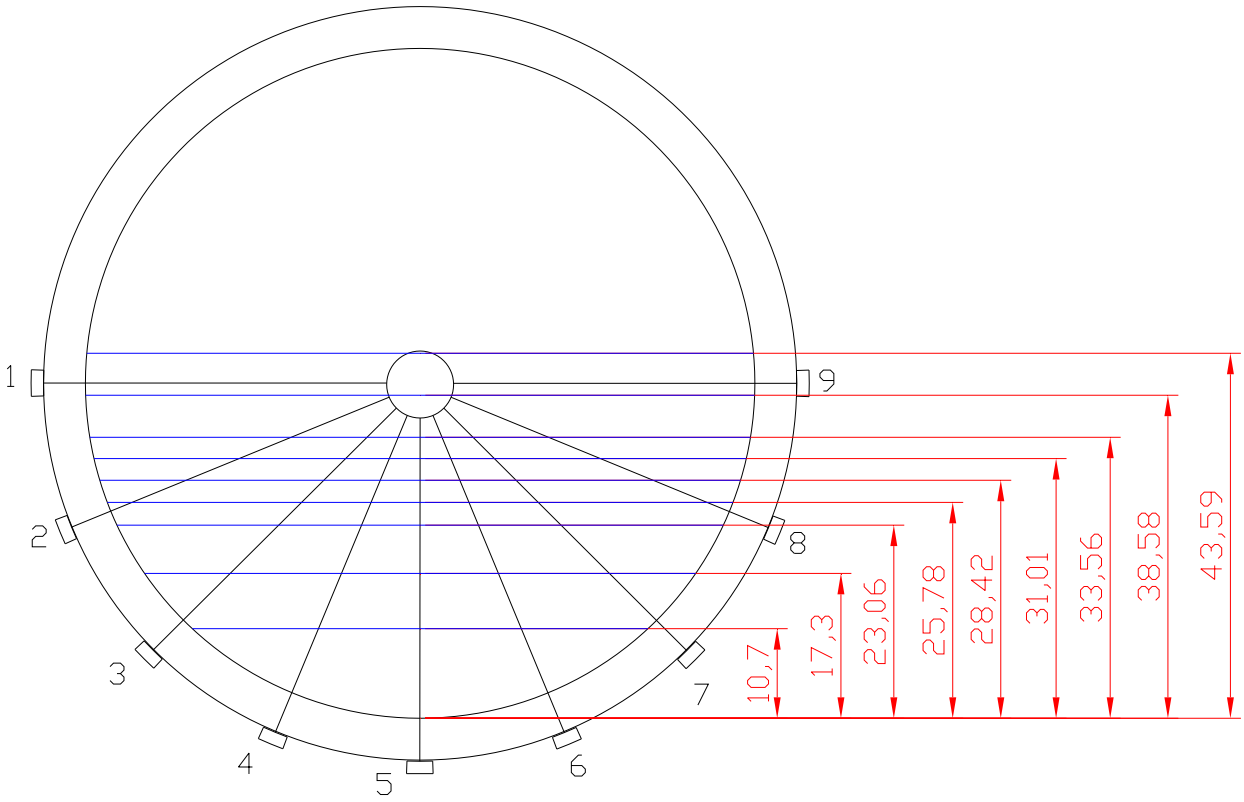


Fig. 10 - Configurazione degli elettrodi per orientamento orizzontale della sonda capacitiva

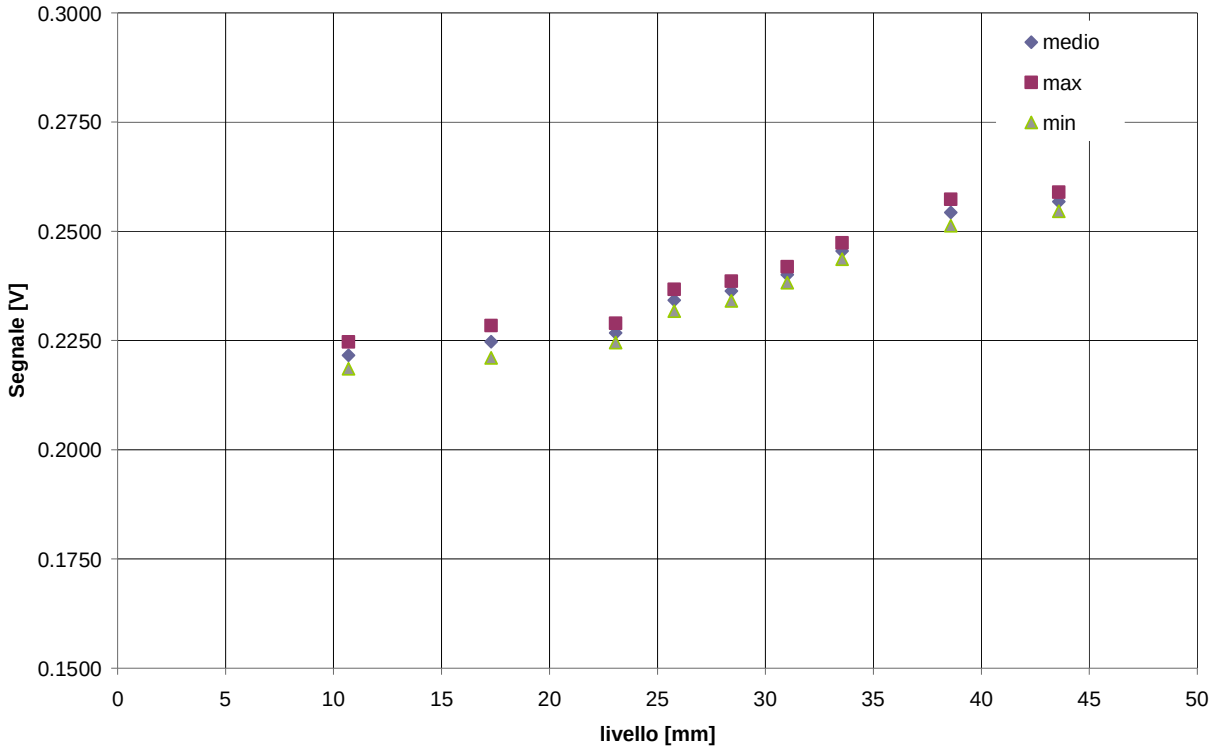


Fig. 11 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 2

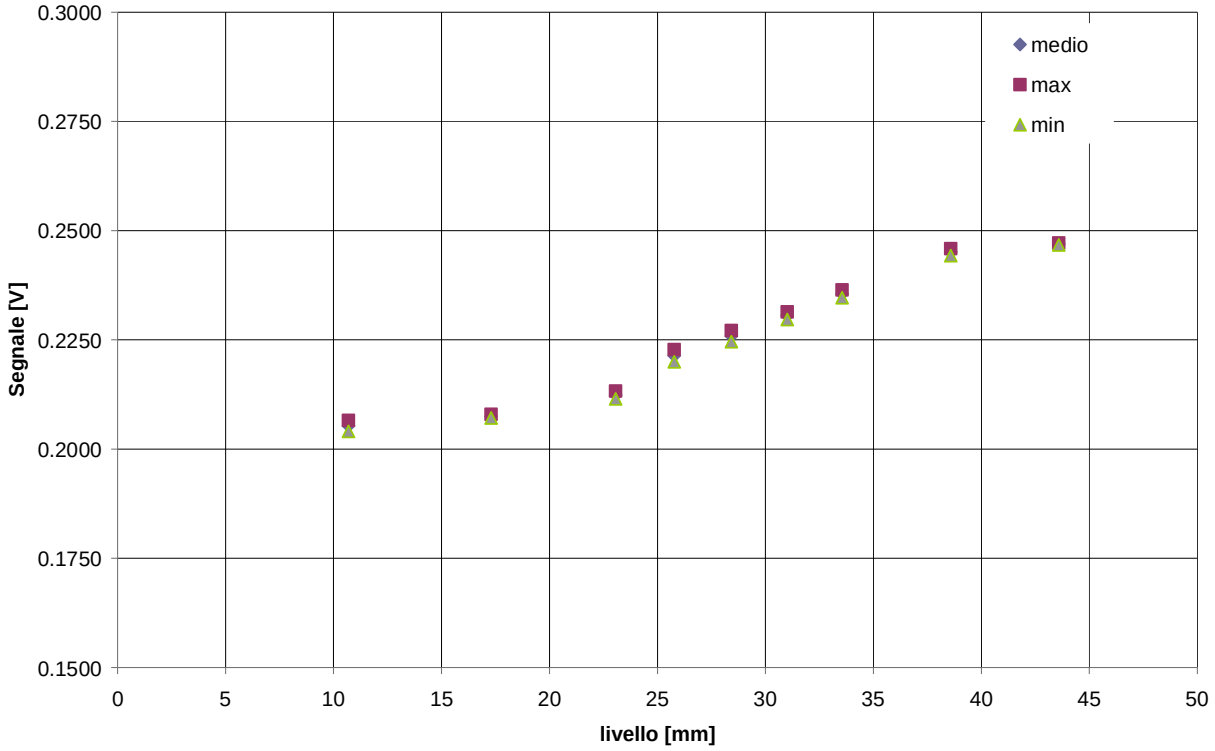


Fig. 12 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 3

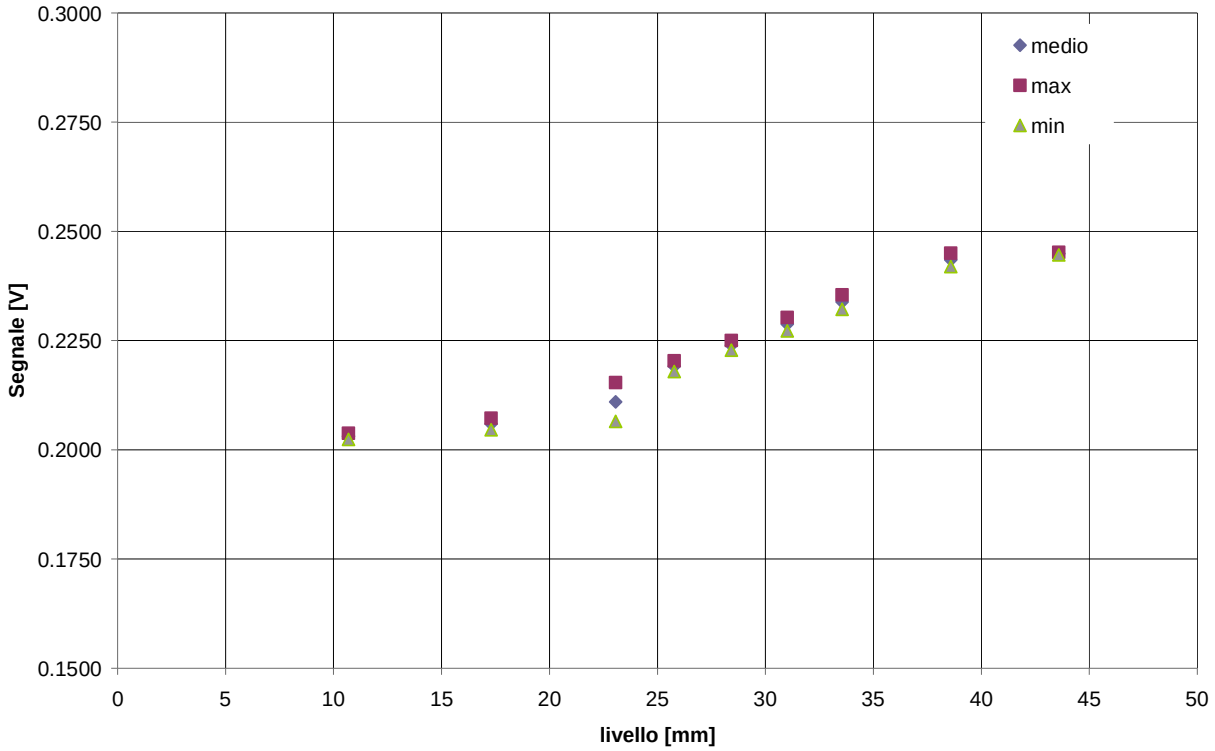


Fig. 13 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 4

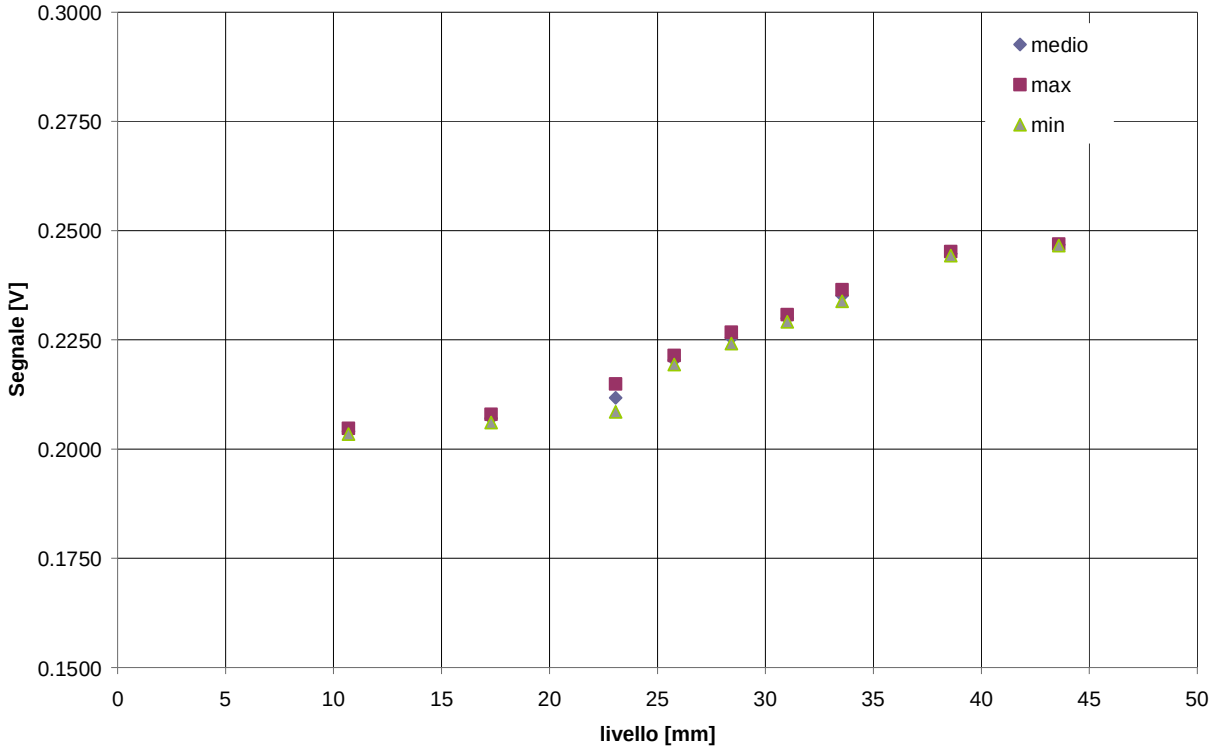


Fig. 14 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 5

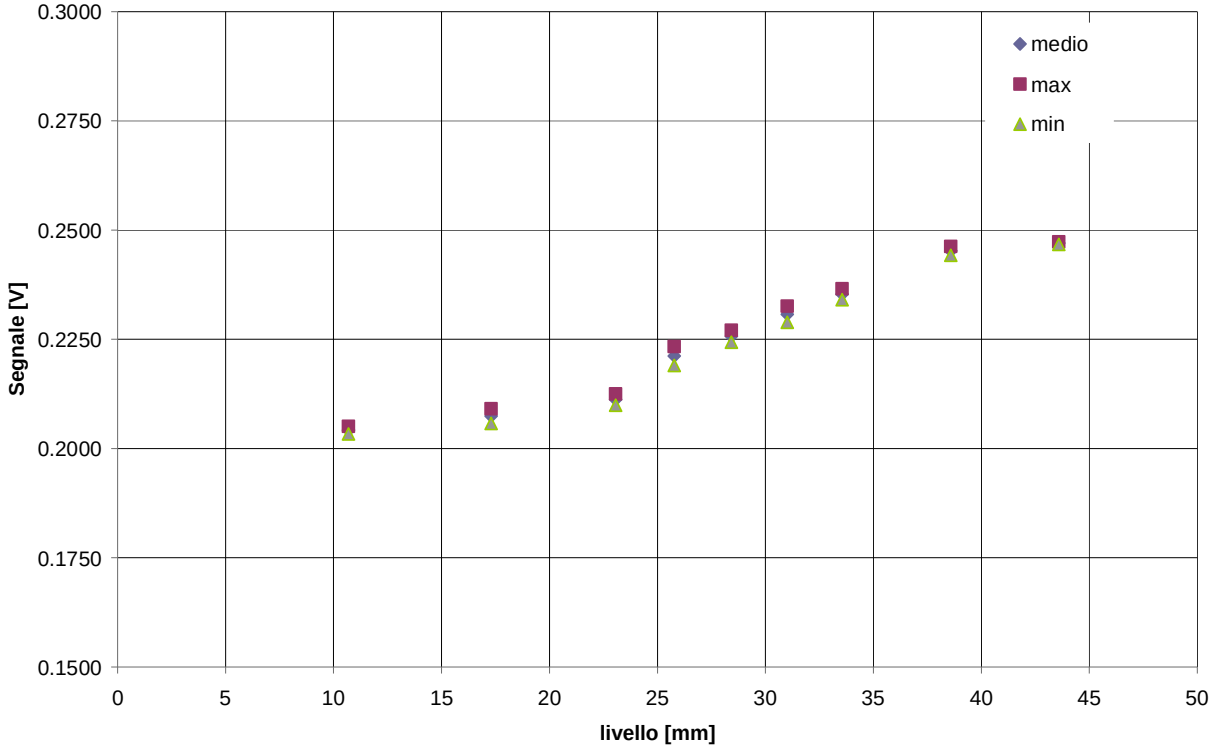


Fig. 15 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 6

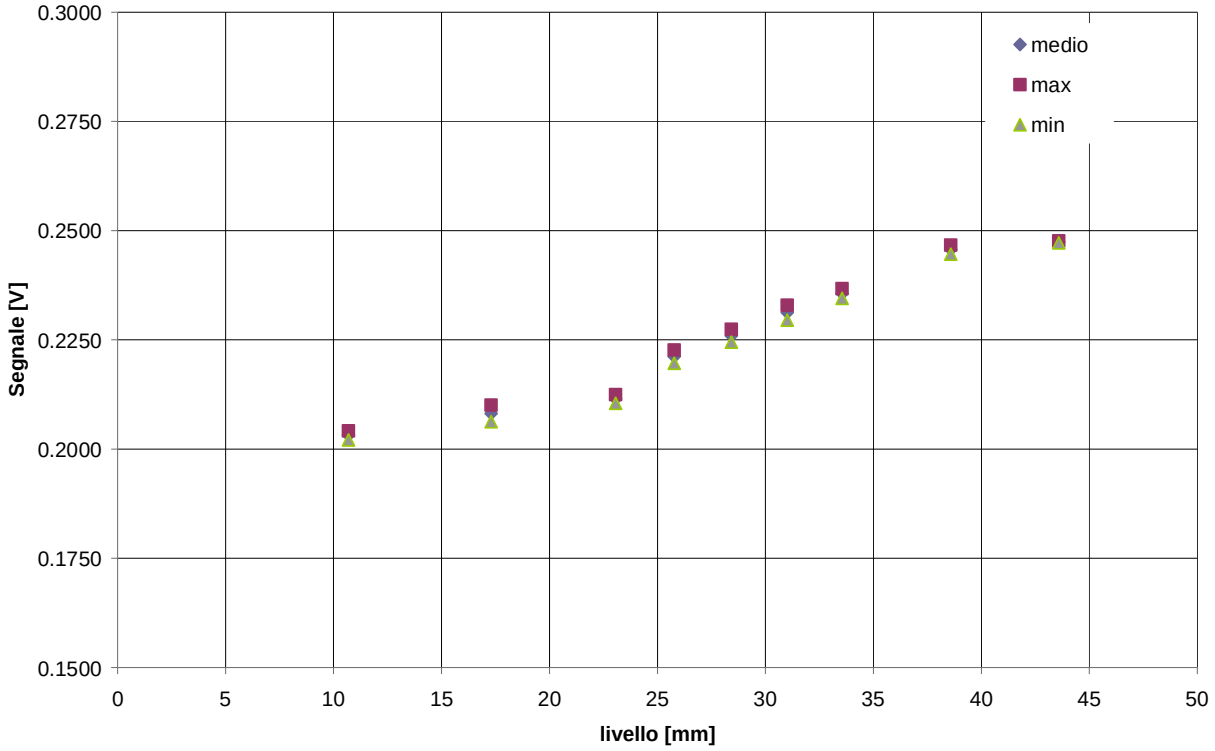


Fig. 16 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 7

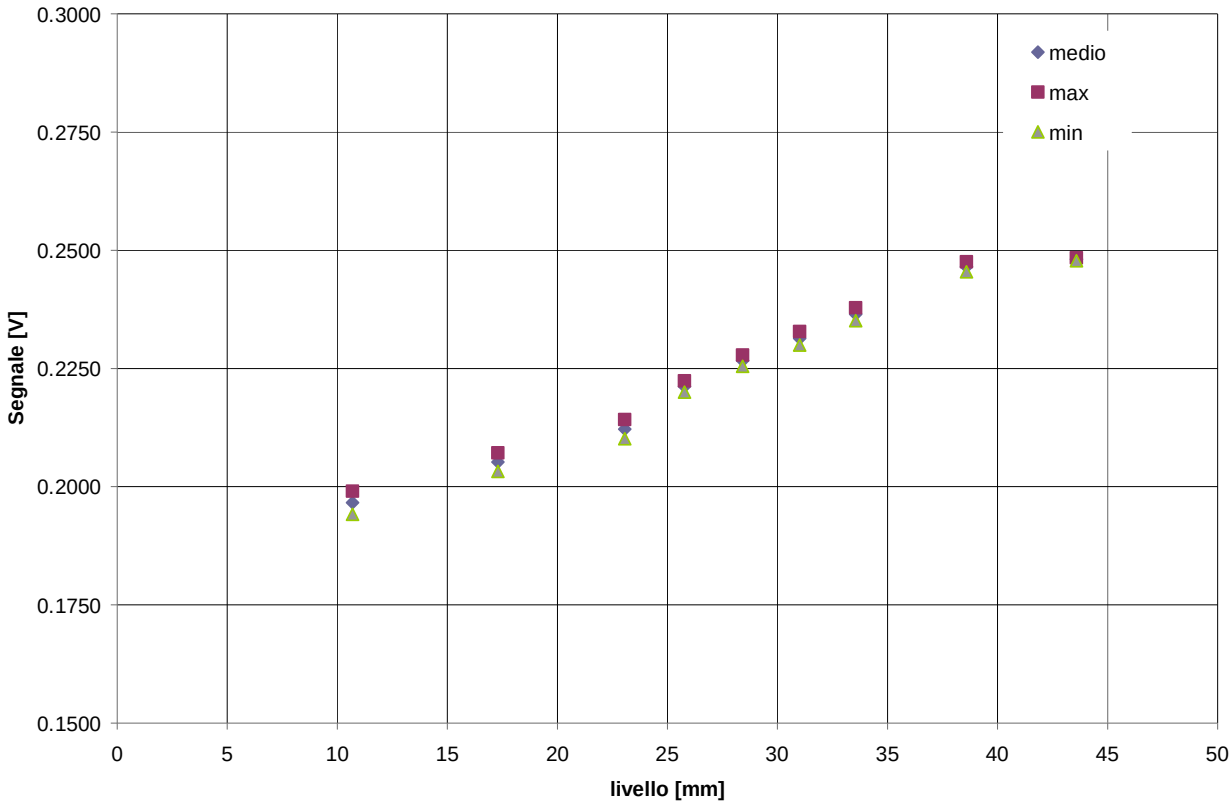


Fig. 17 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 8

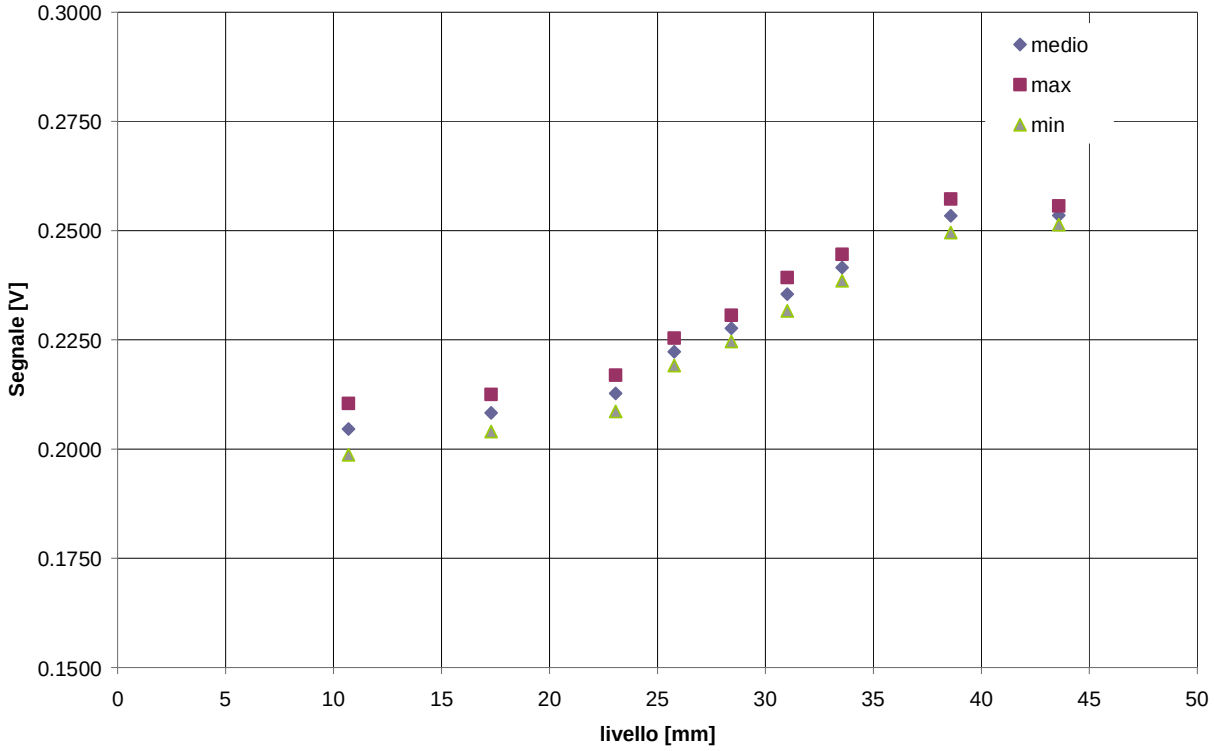


Fig. 18 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 9

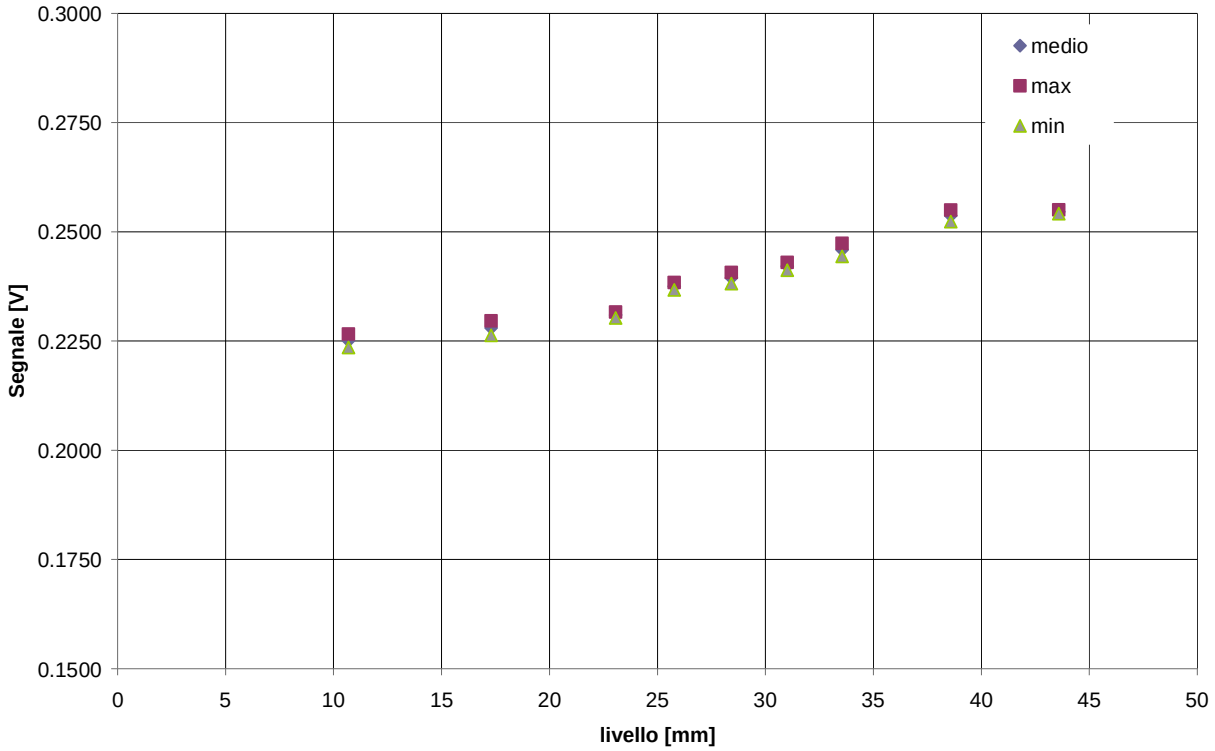


Fig. 19 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 1

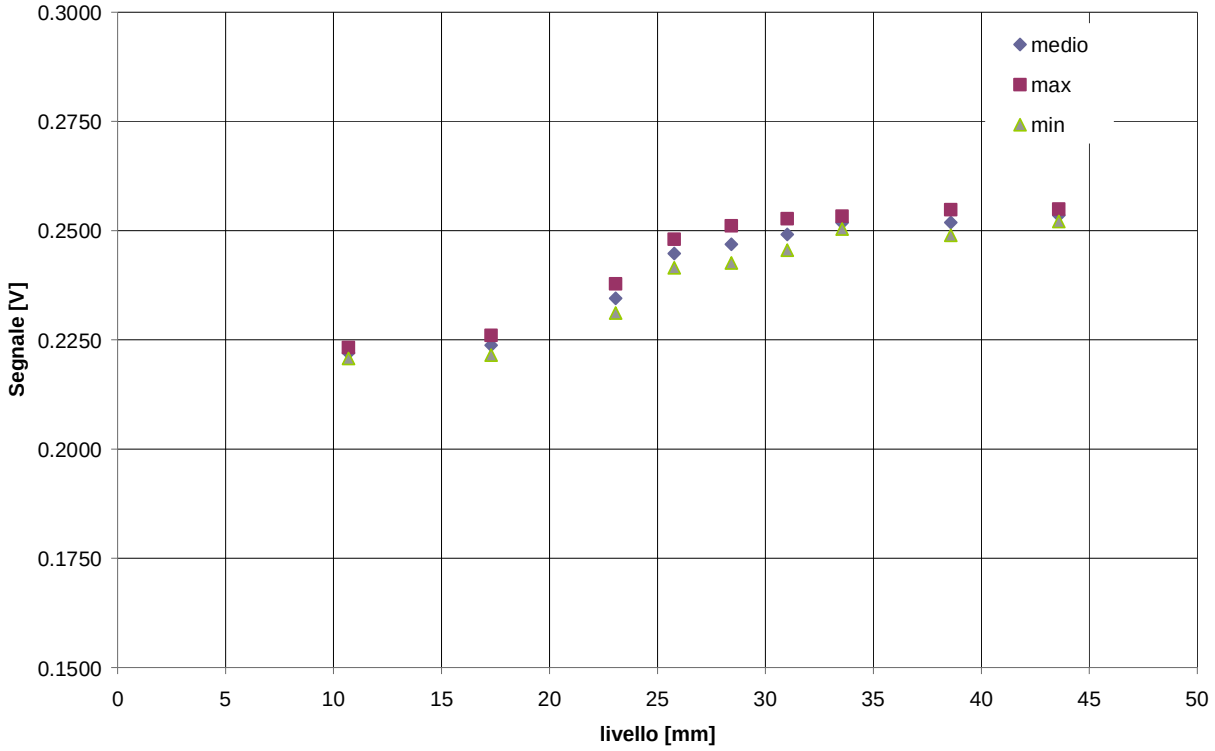


Fig. 20 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 3

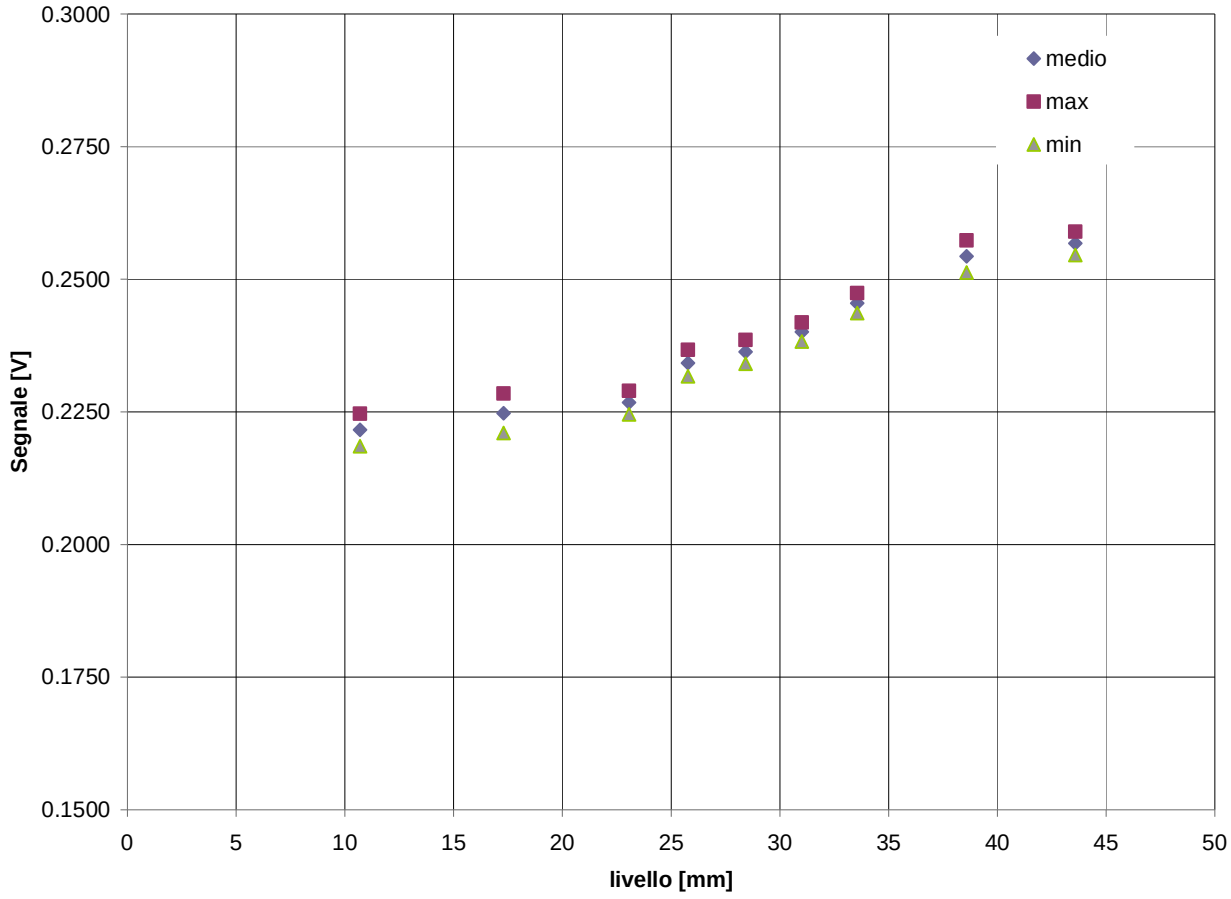


Fig. 21 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 4

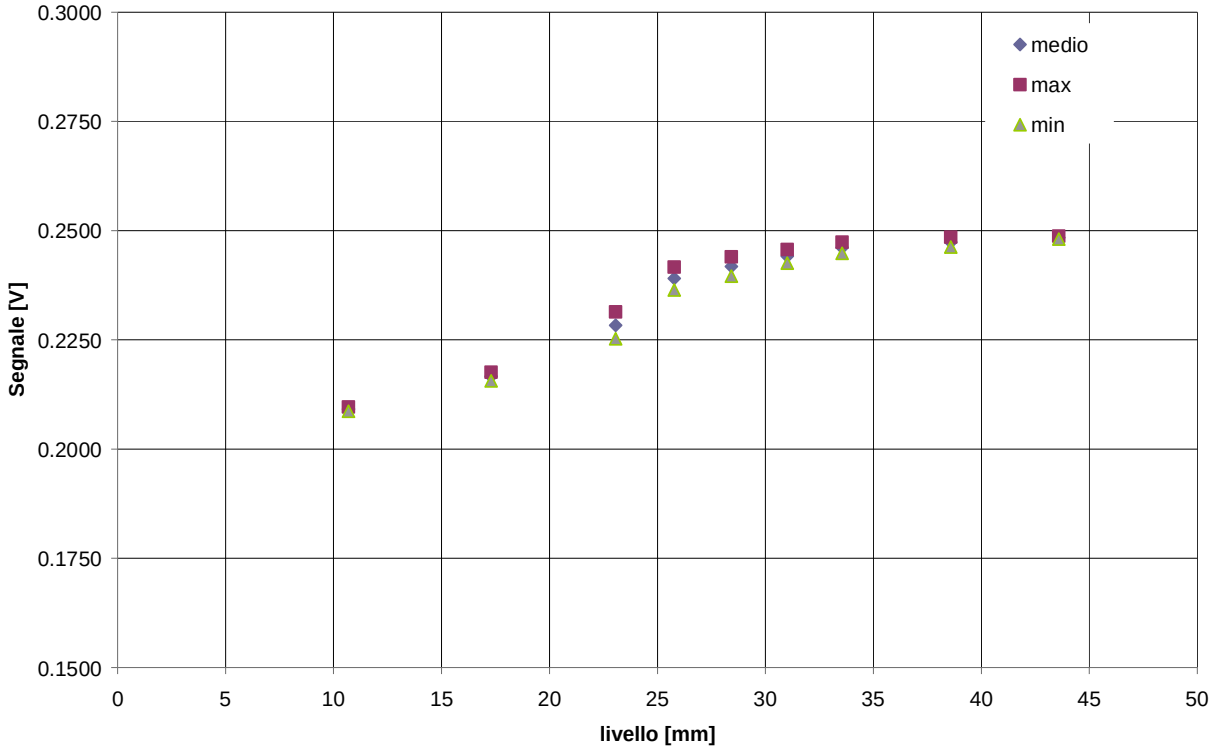


Fig. 22 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 5

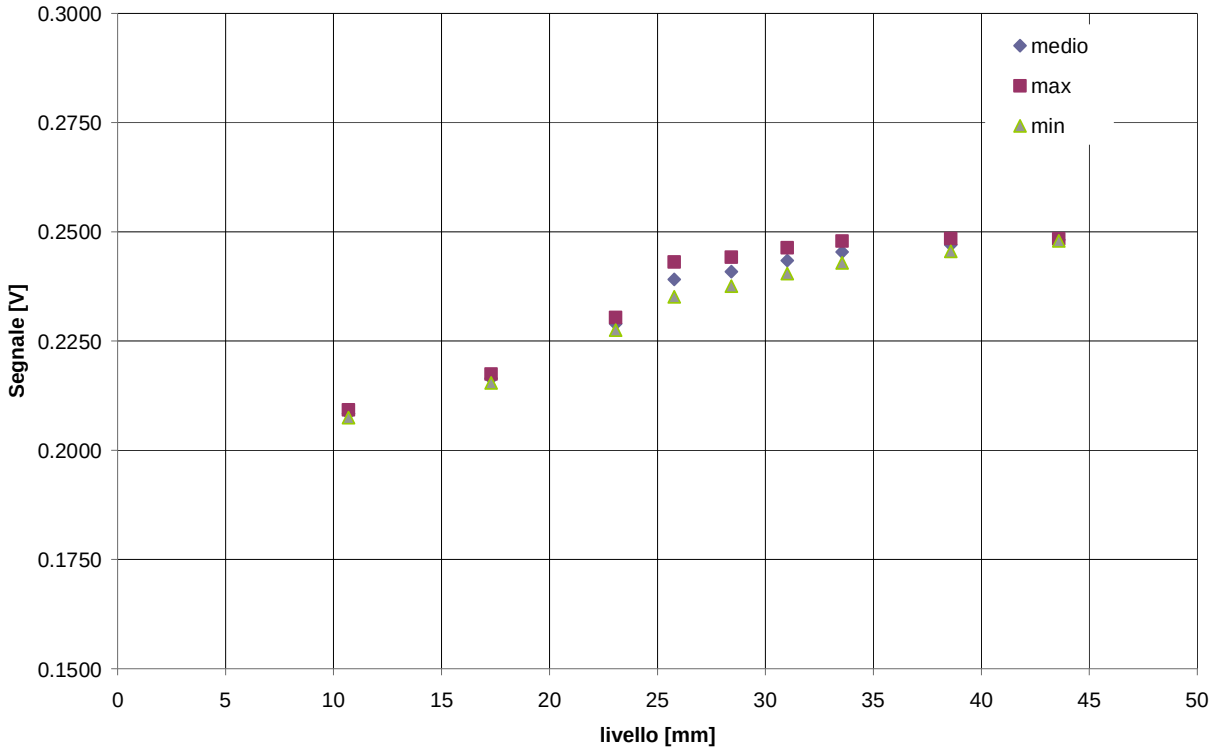


Fig. 23 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 6

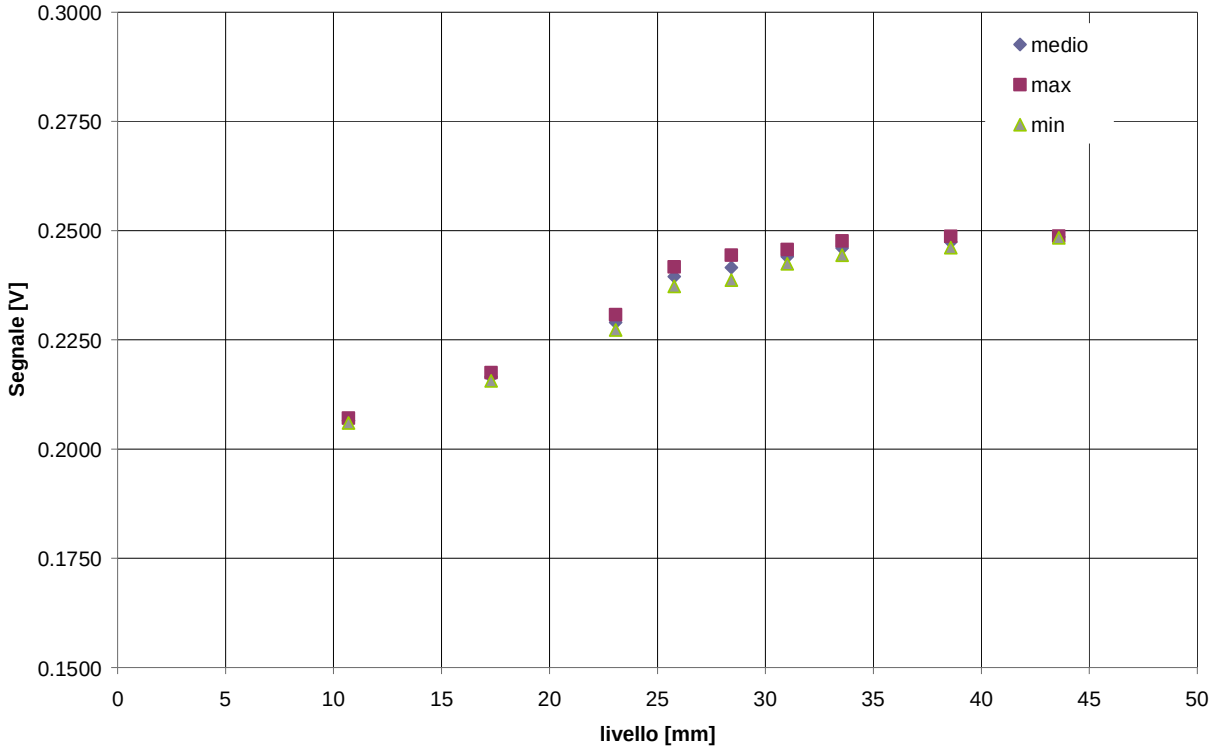


Fig. 24 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 7

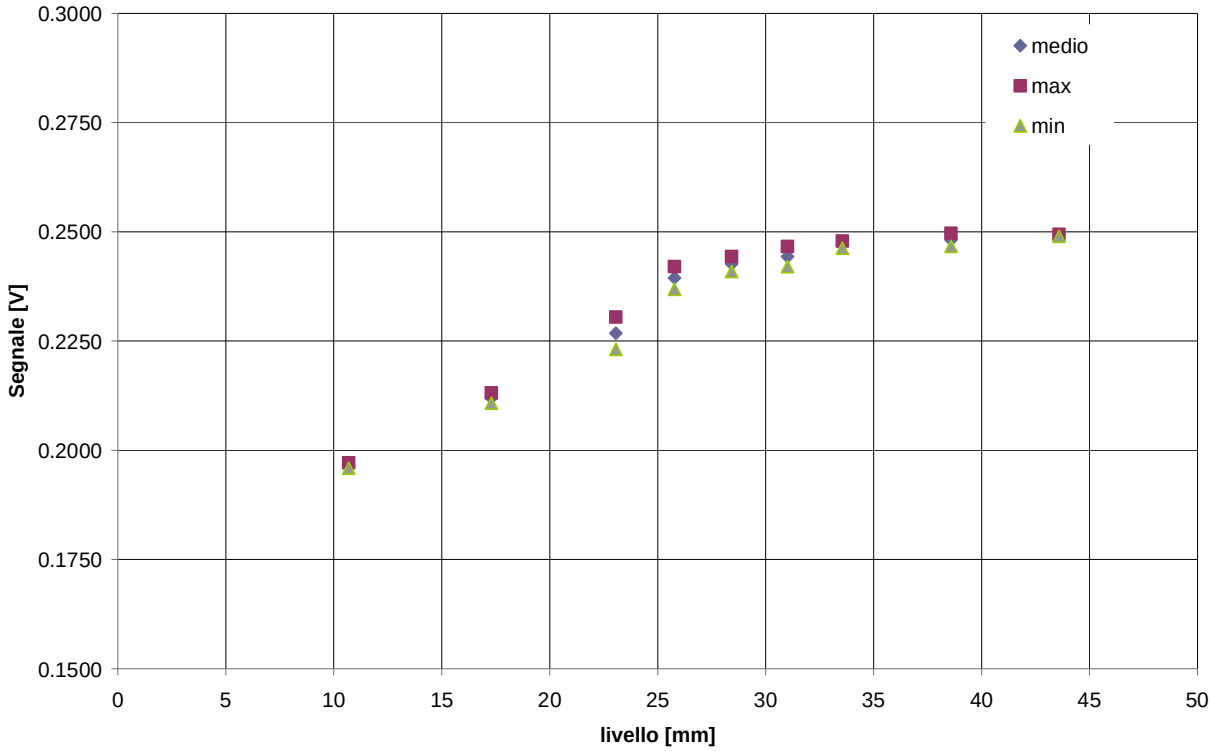


Fig. 25 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 8

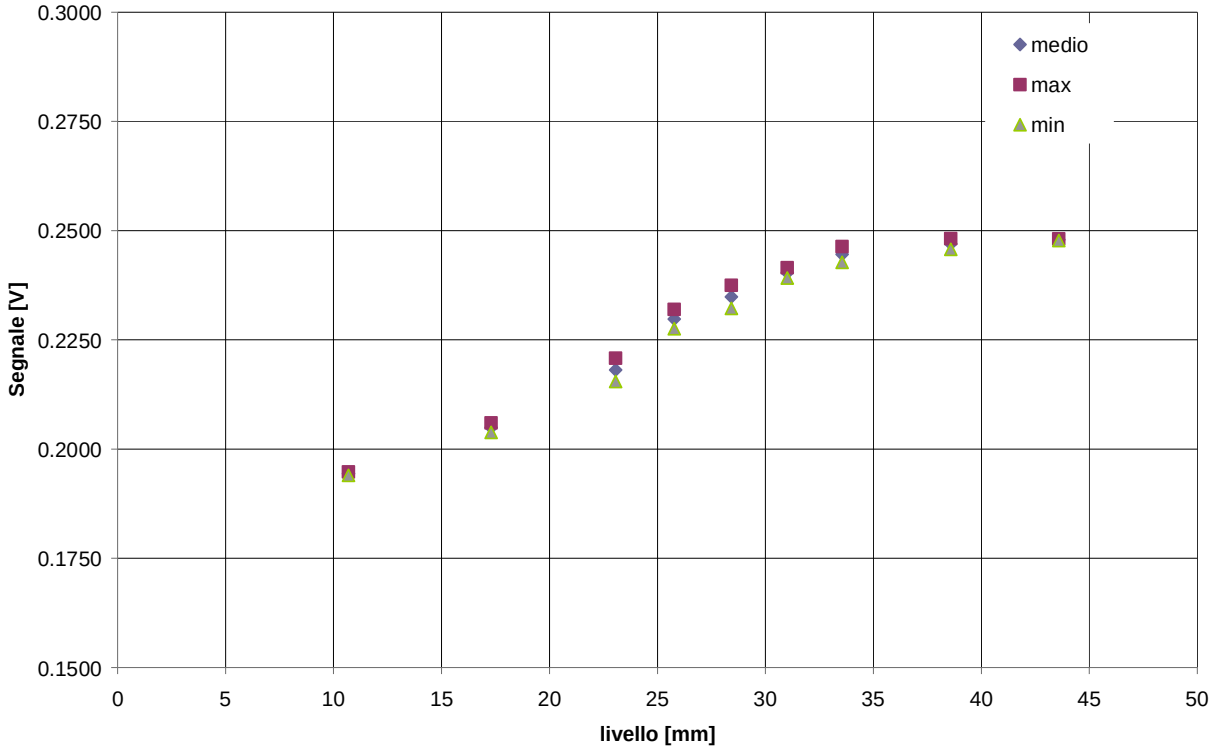


Fig. 26 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 9

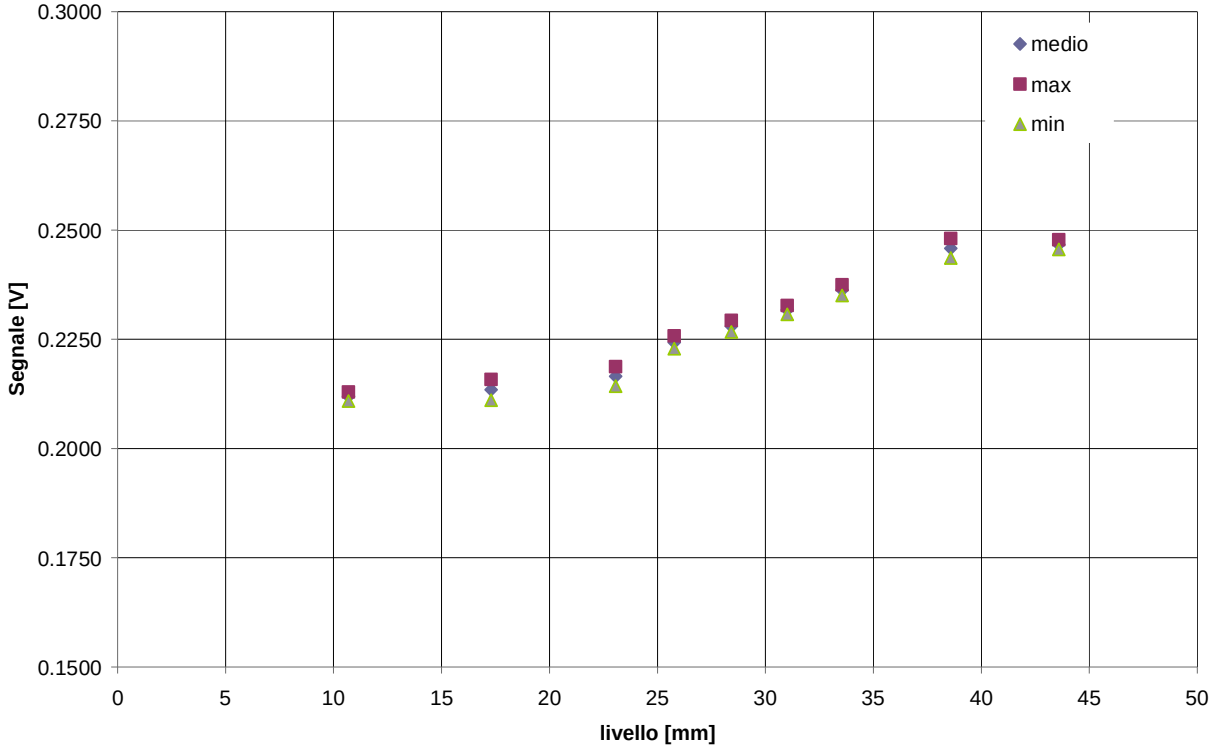


Fig. 27 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 1

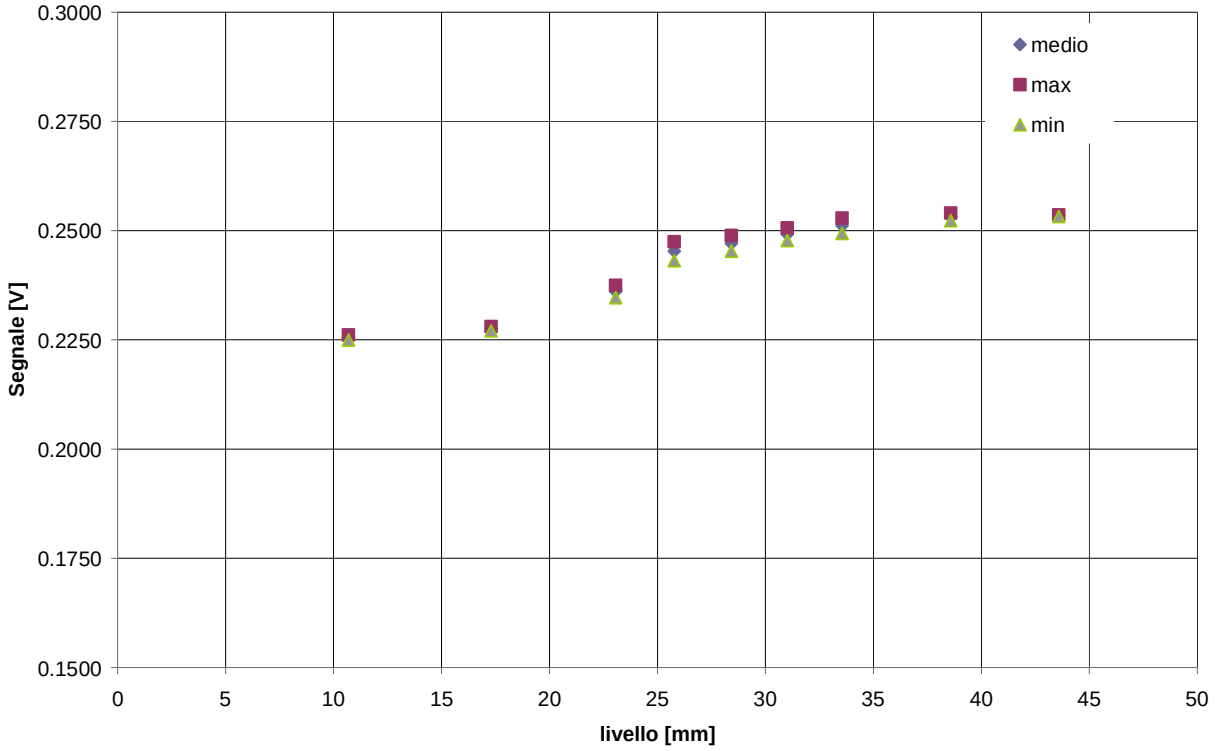


Fig. 28 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 2

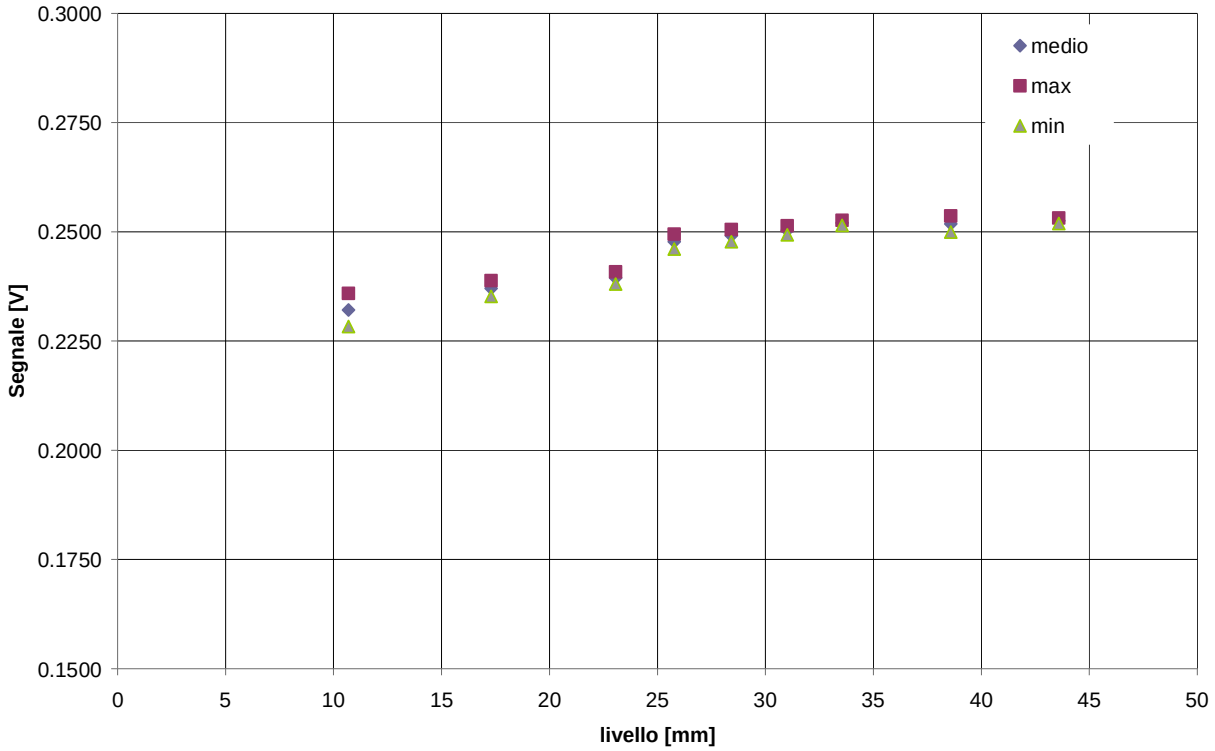


Fig. 29 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 4

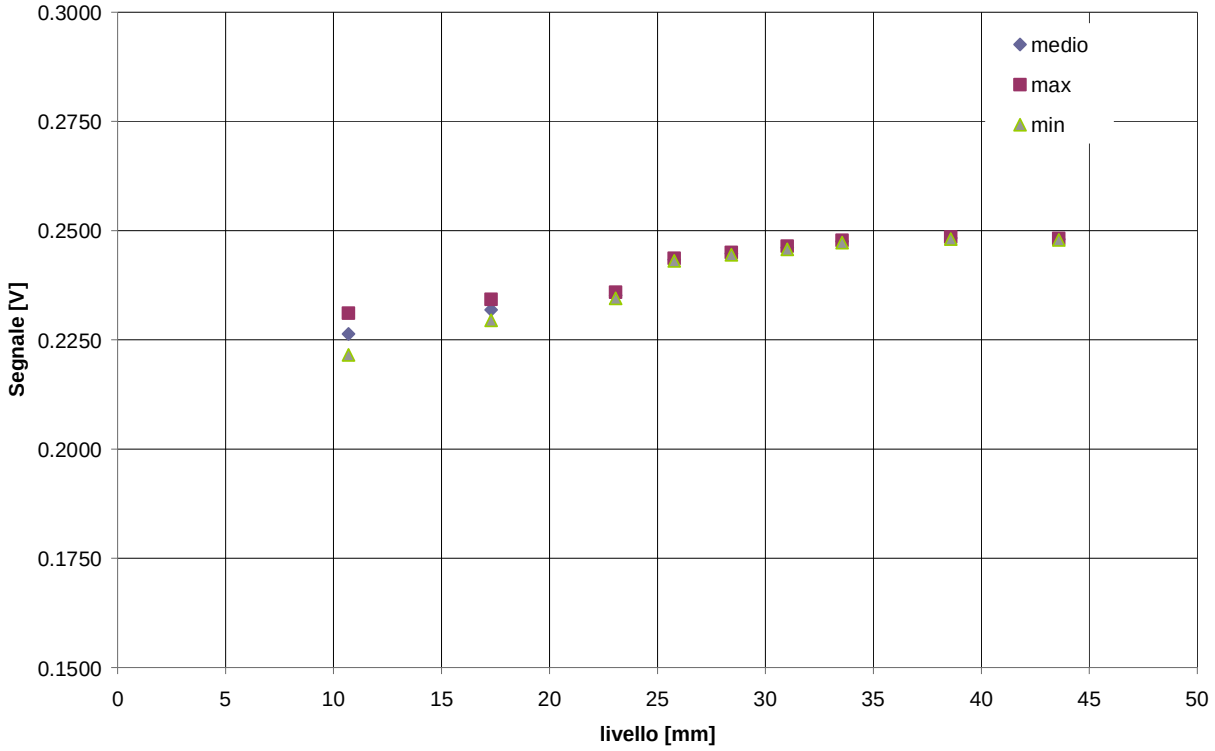


Fig. 30 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 5

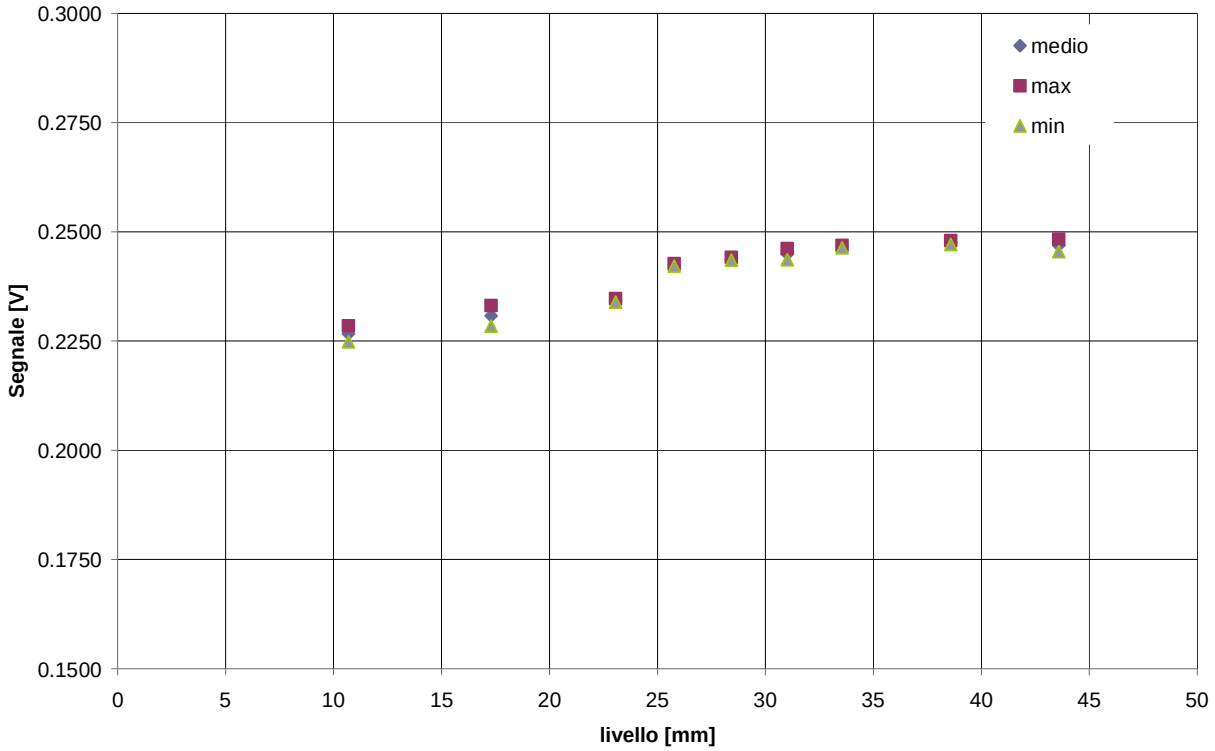


Fig. 31 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 6

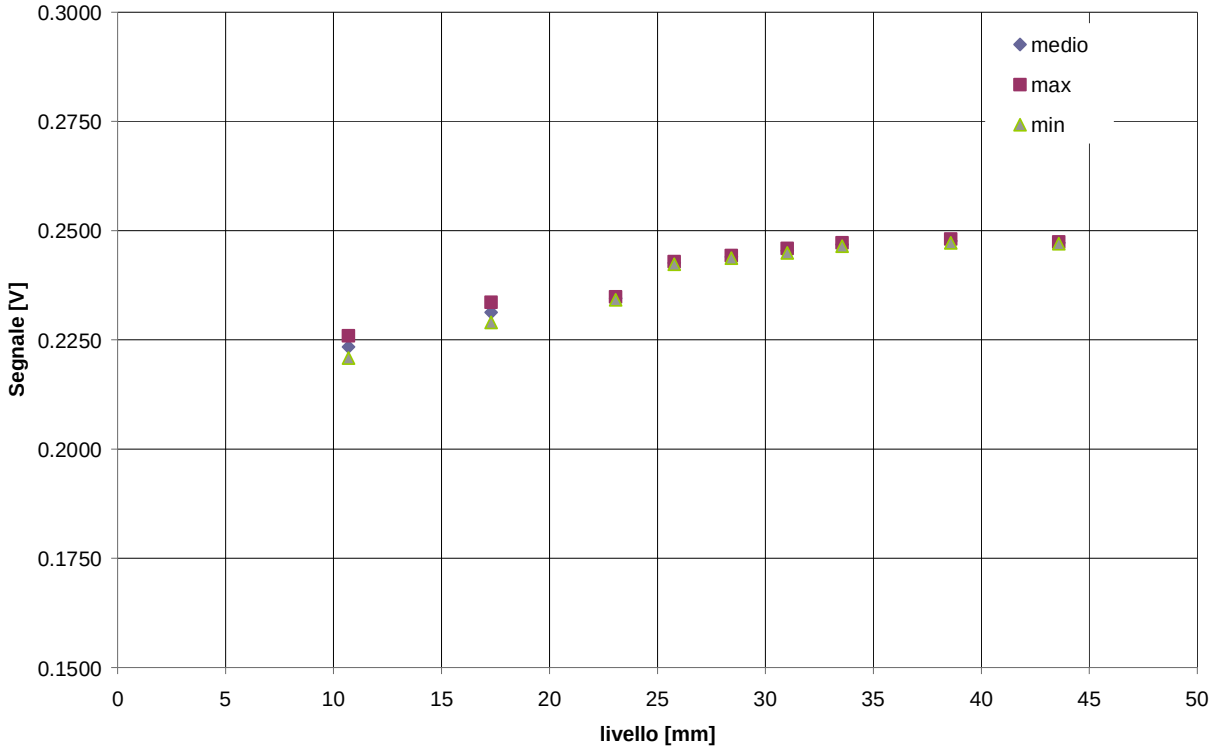


Fig. 32 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 7

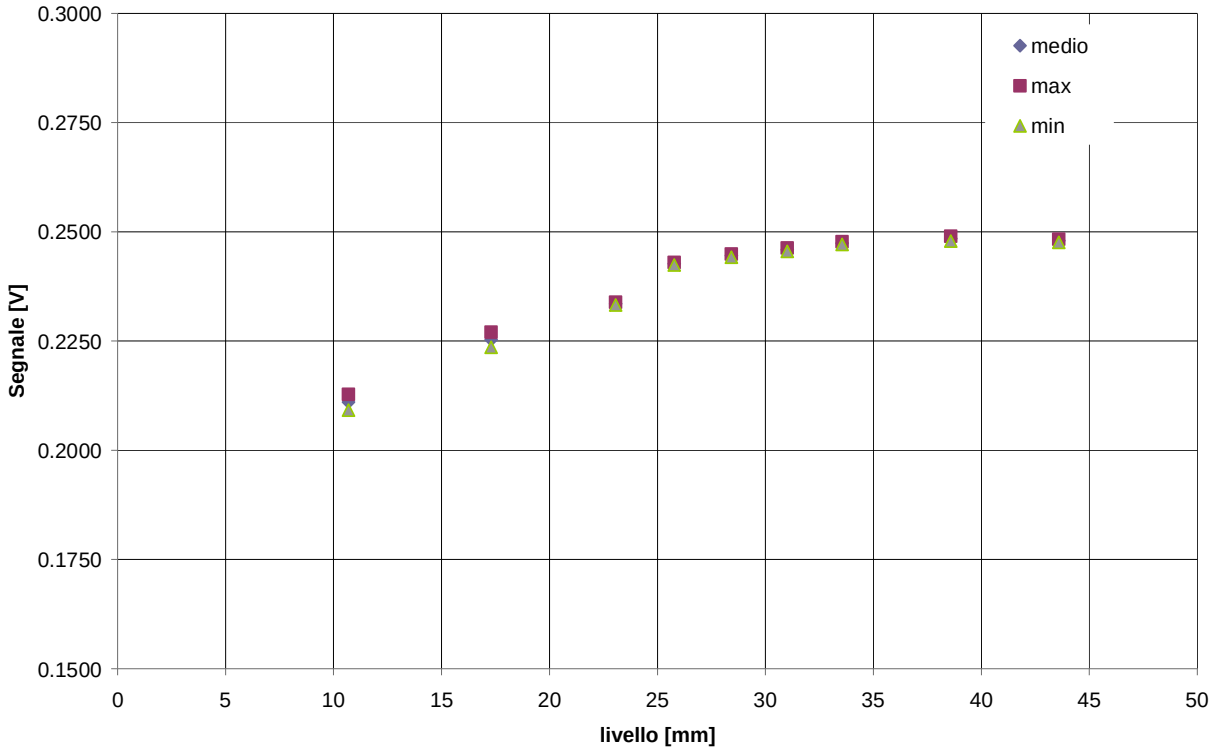


Fig. 33 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 8

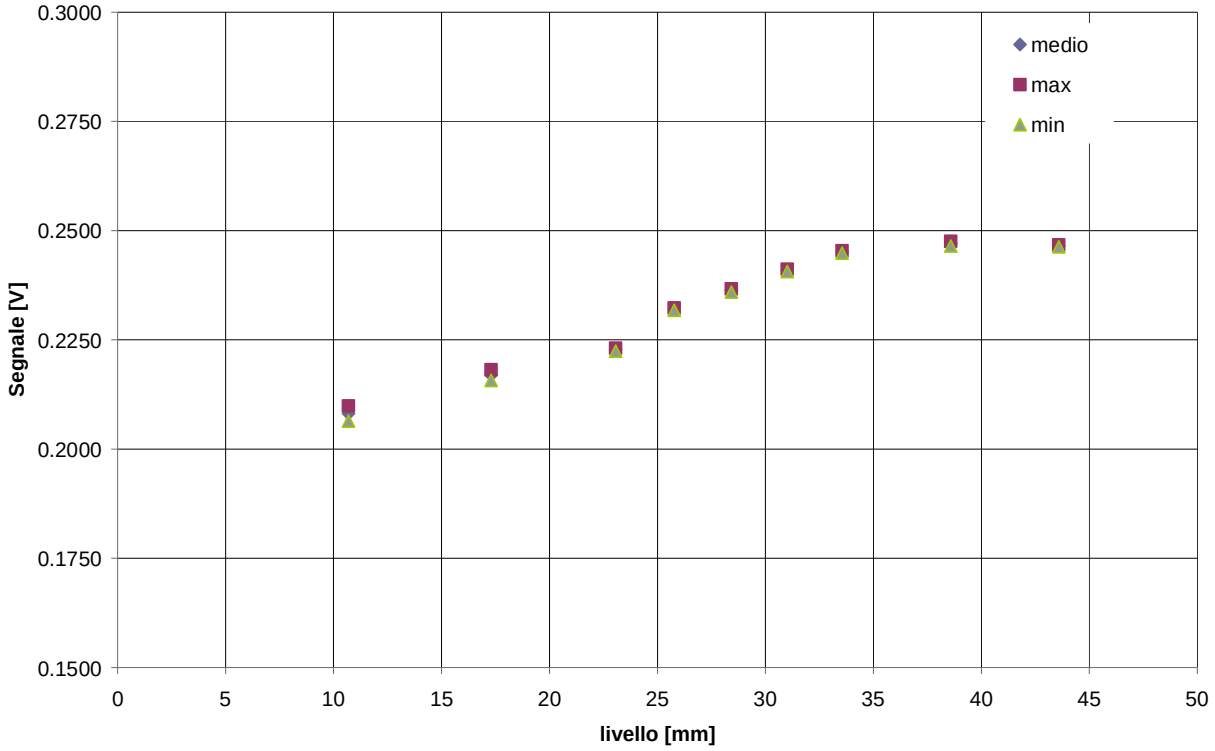


Fig. 34 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 9

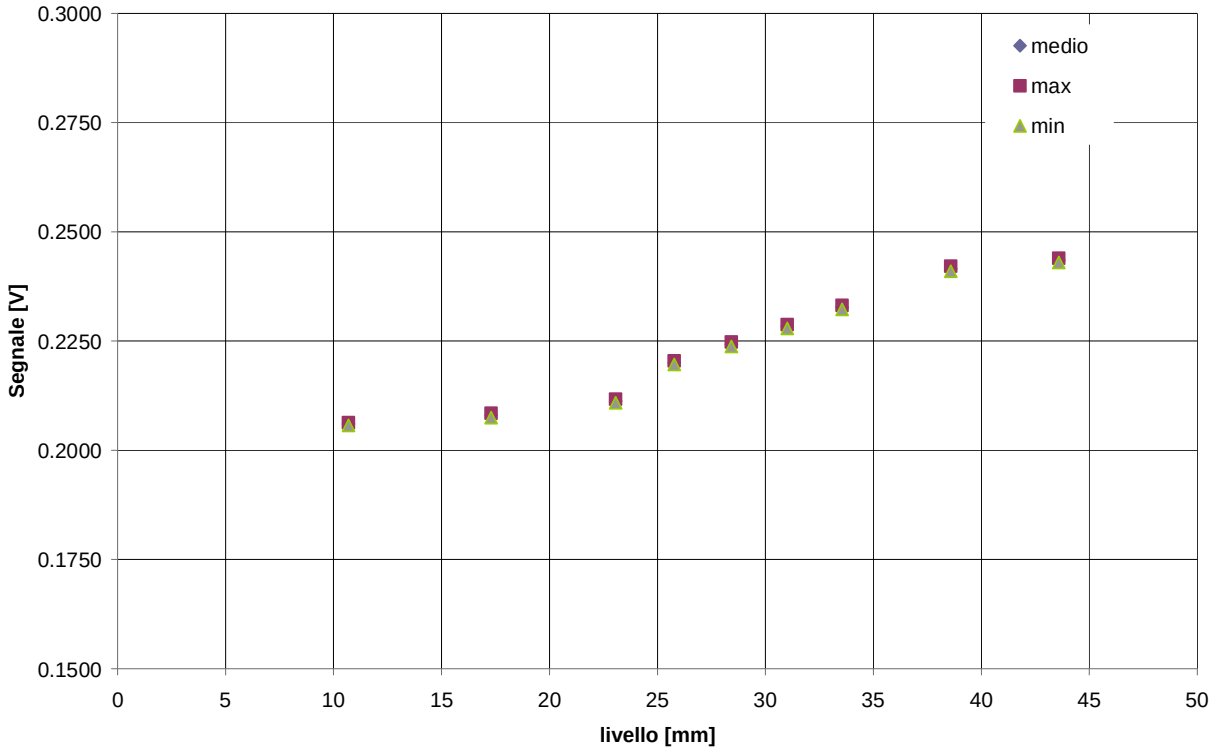


Fig. 35 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 1

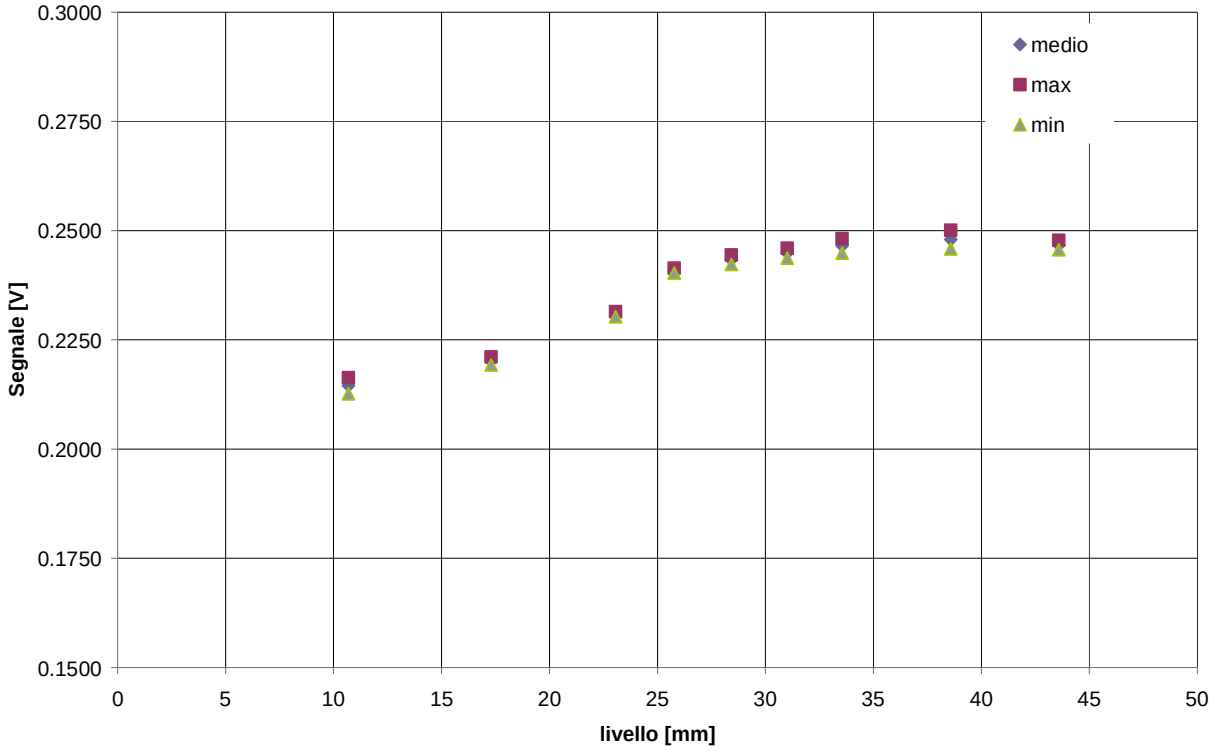


Fig. 36 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 2

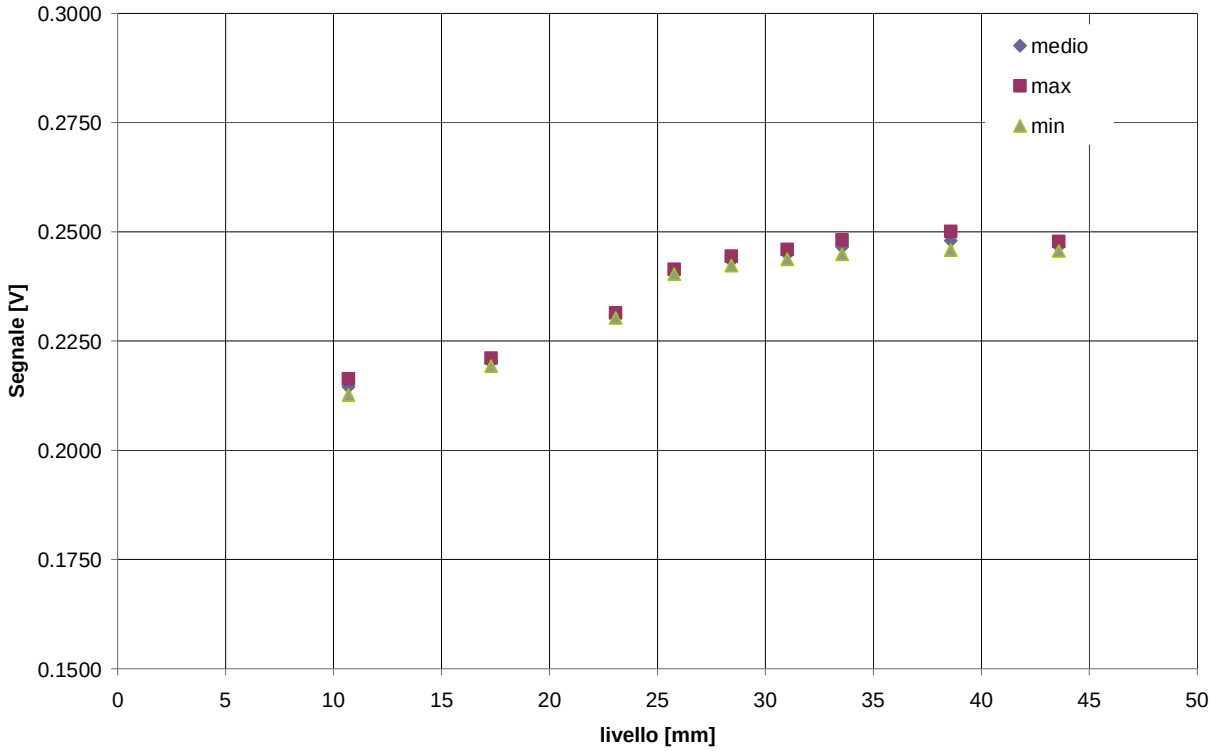


Fig. 37 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 3

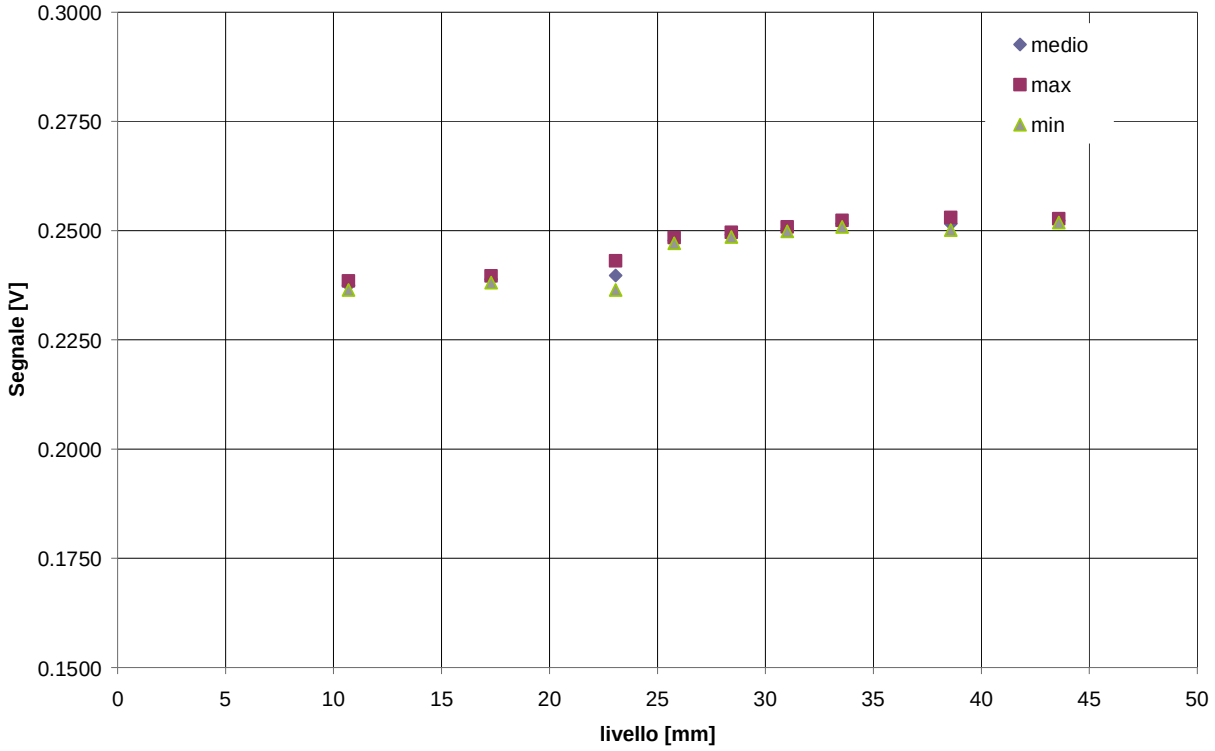


Fig. 38 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 5

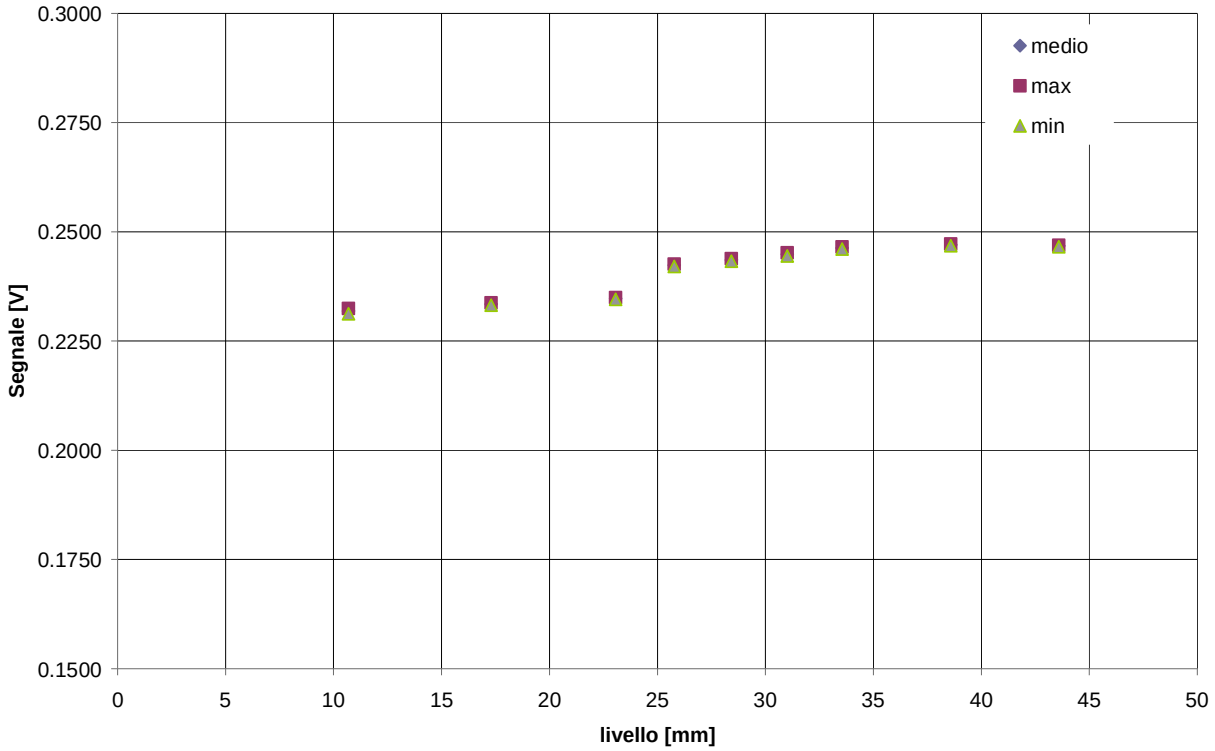


Fig. 39 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 6

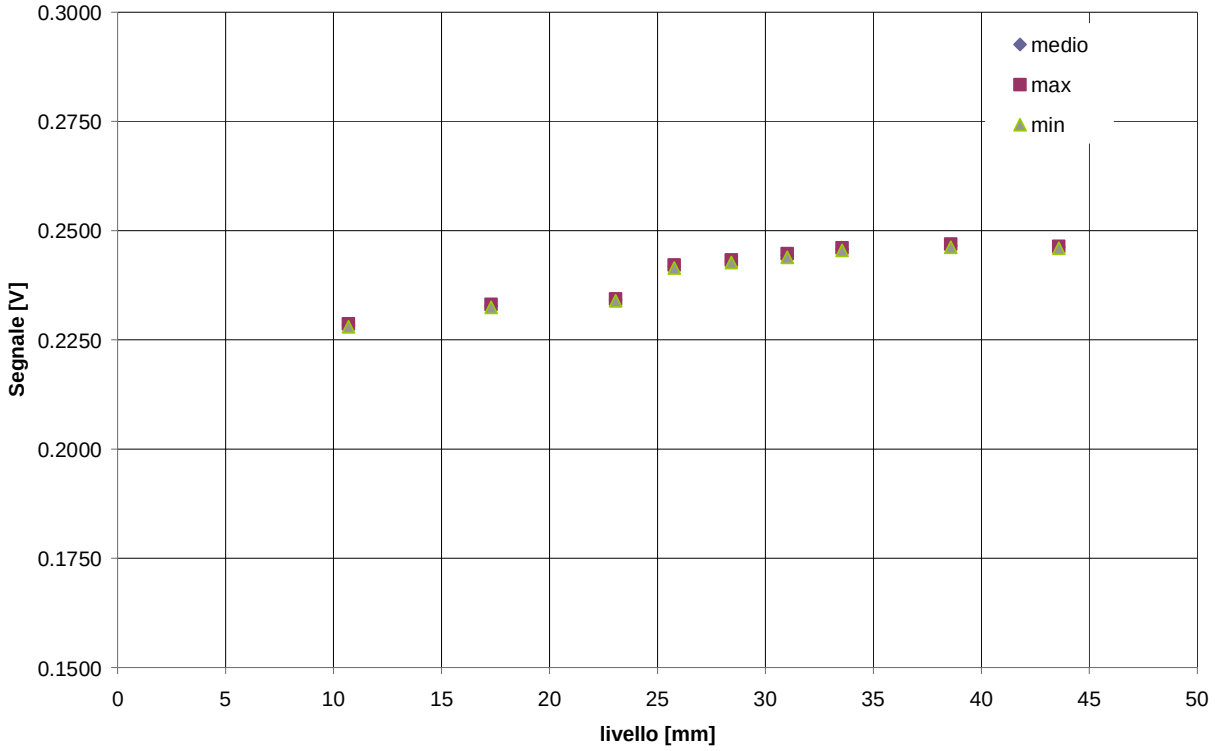


Fig. 40 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 7

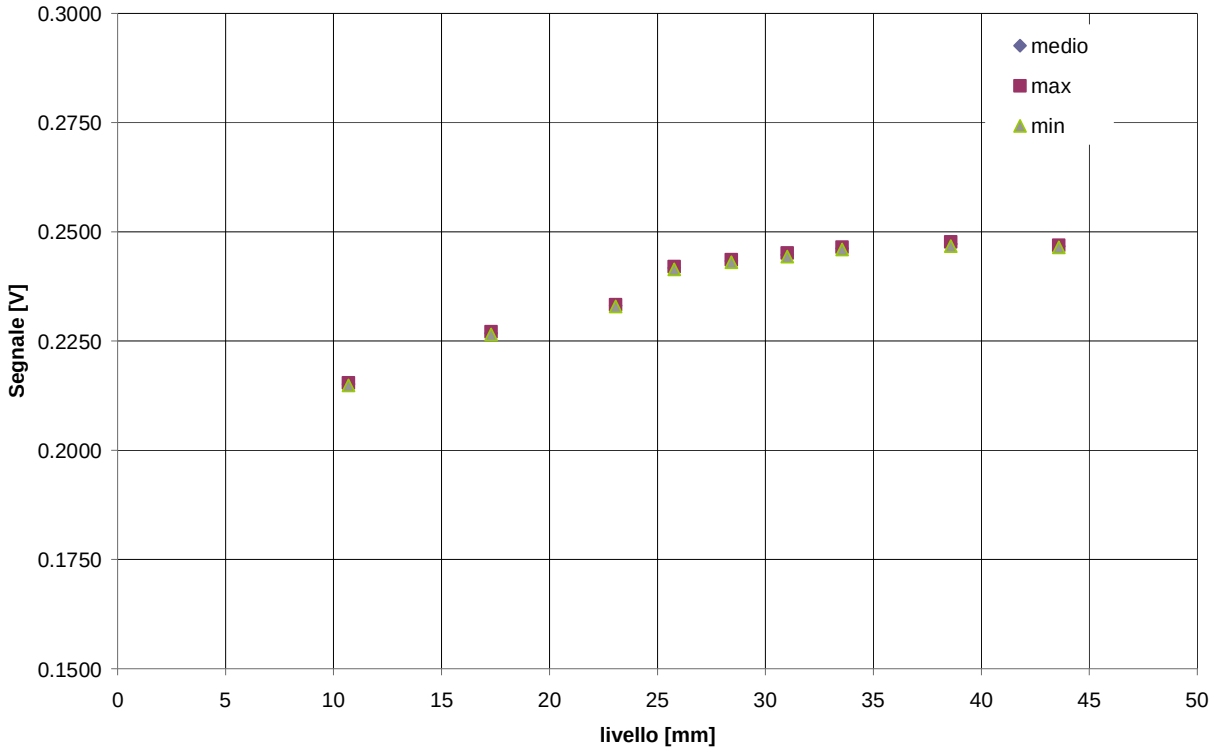


Fig. 41 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 8

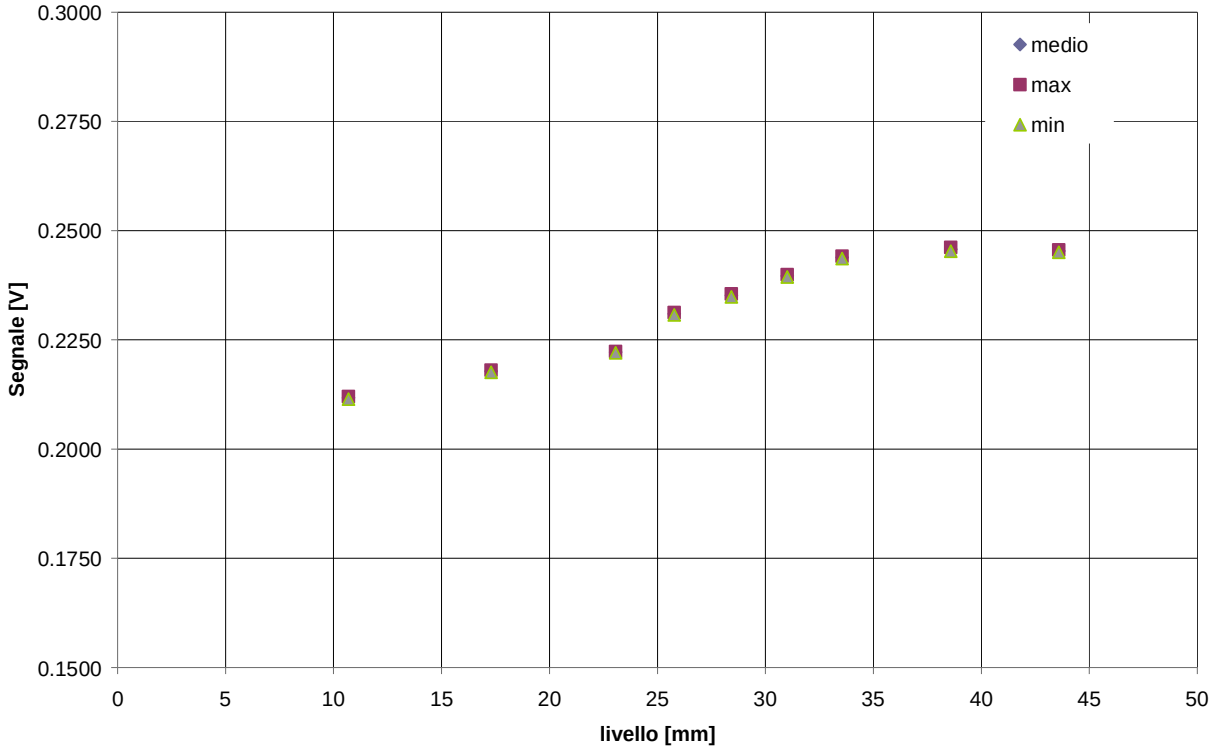


Fig. 42 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 9

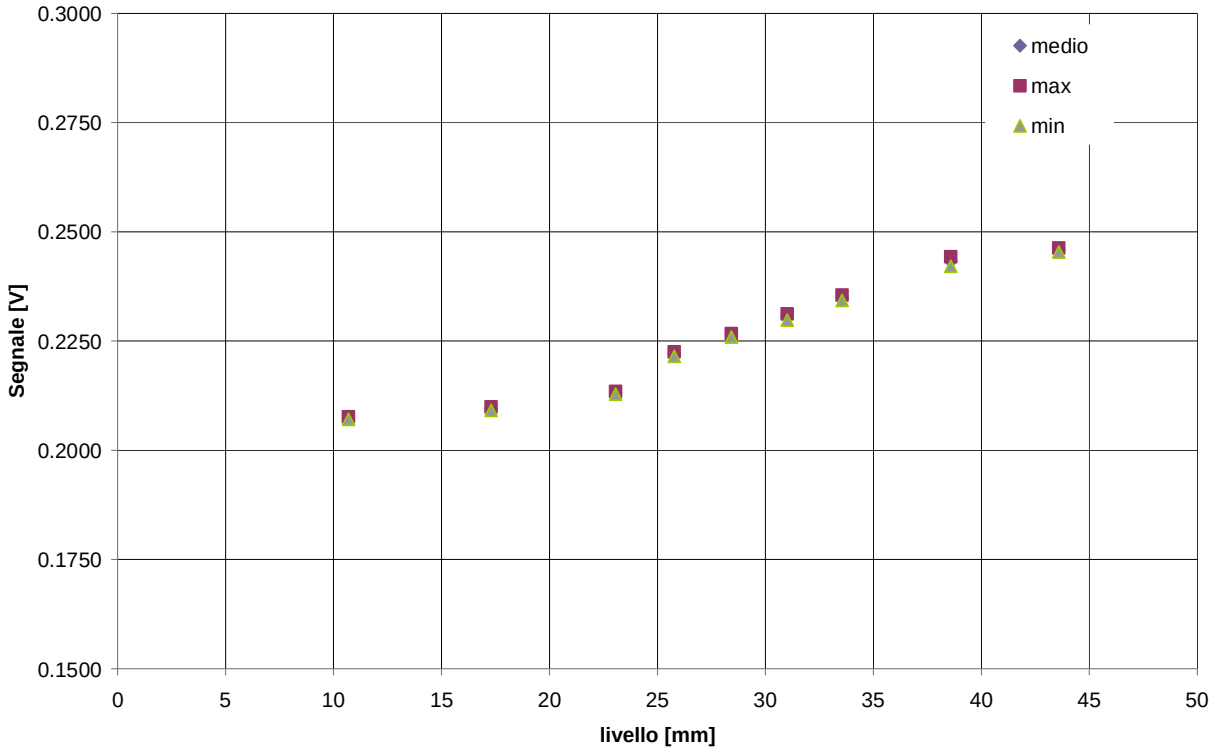


Fig. 43 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 1

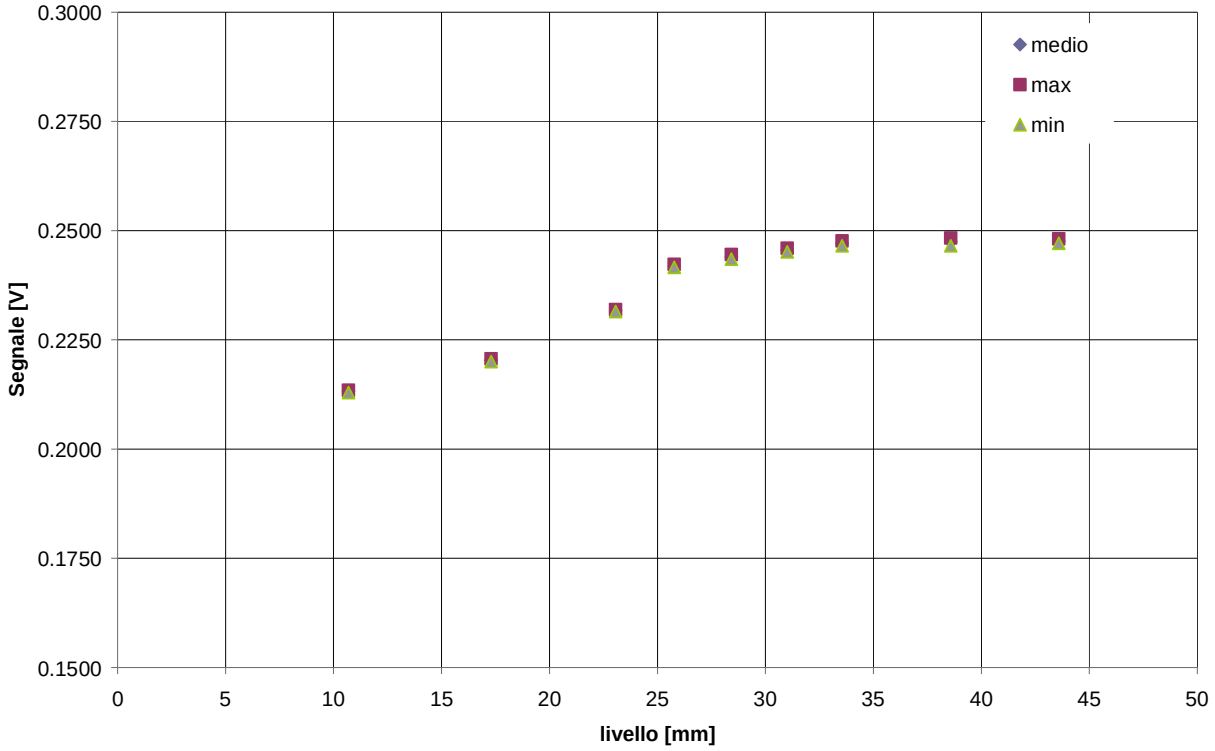


Fig. 44 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 2

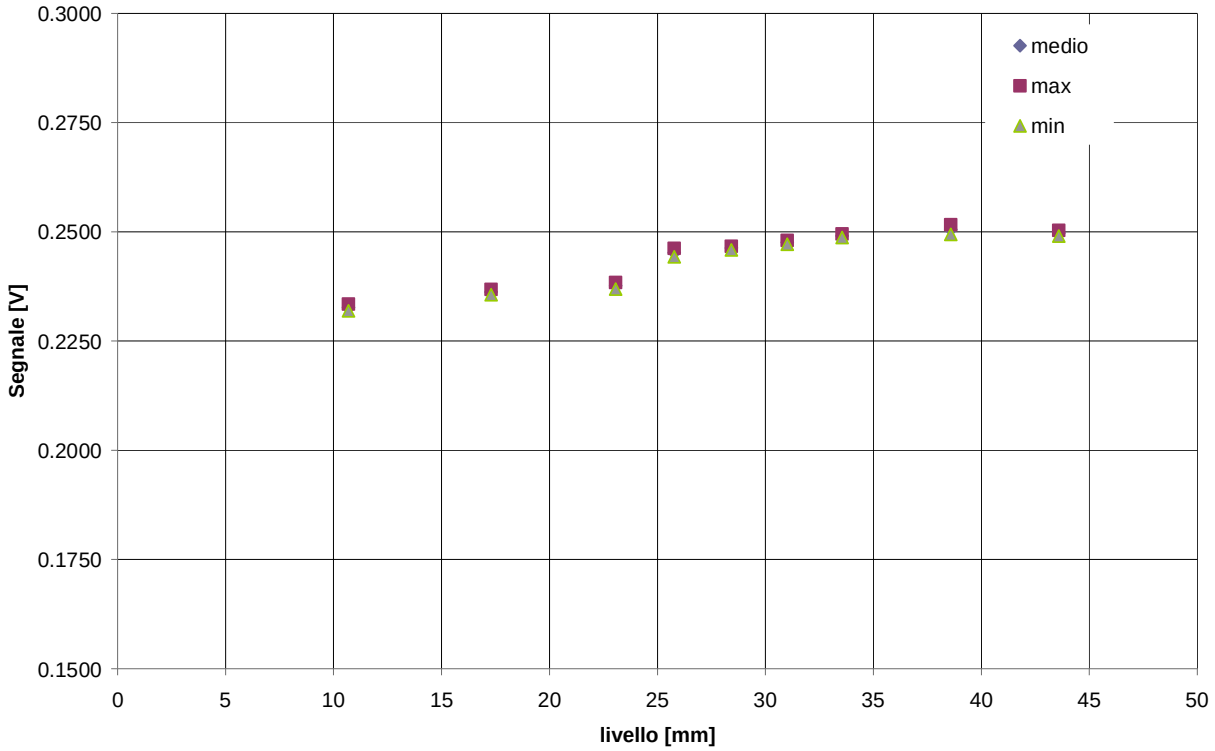


Fig. 45 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 3

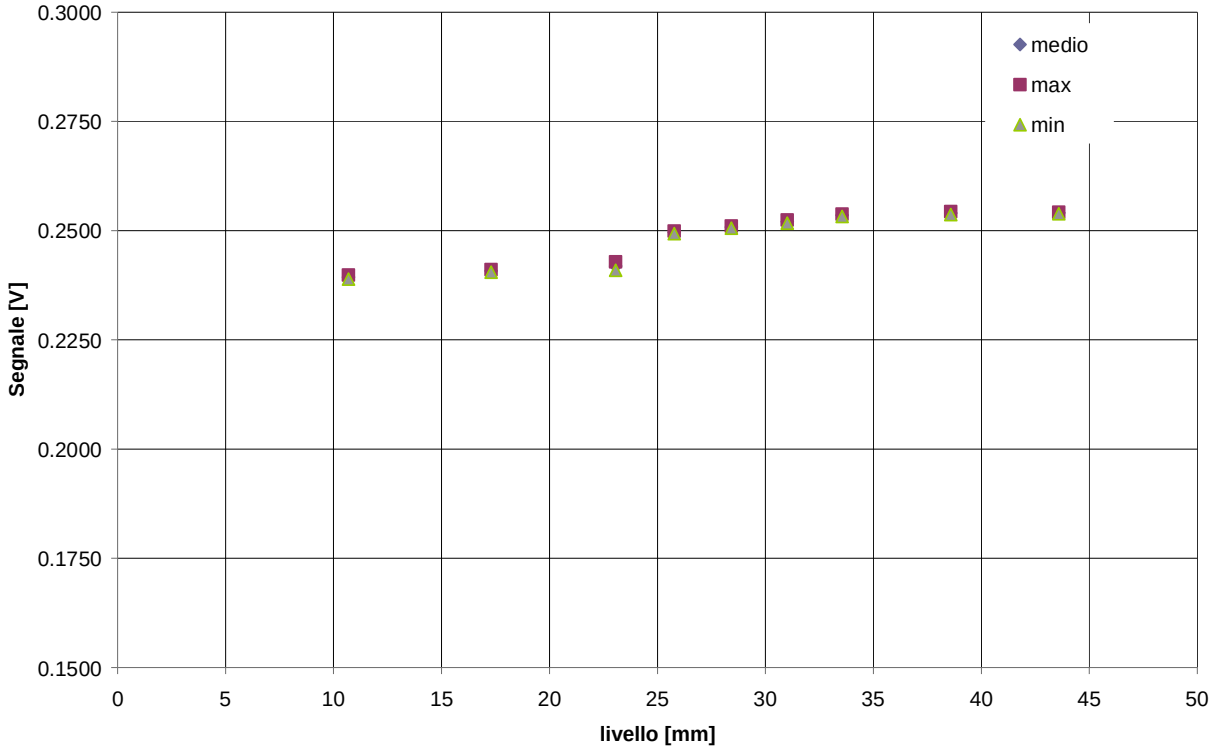


Fig. 46 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 4

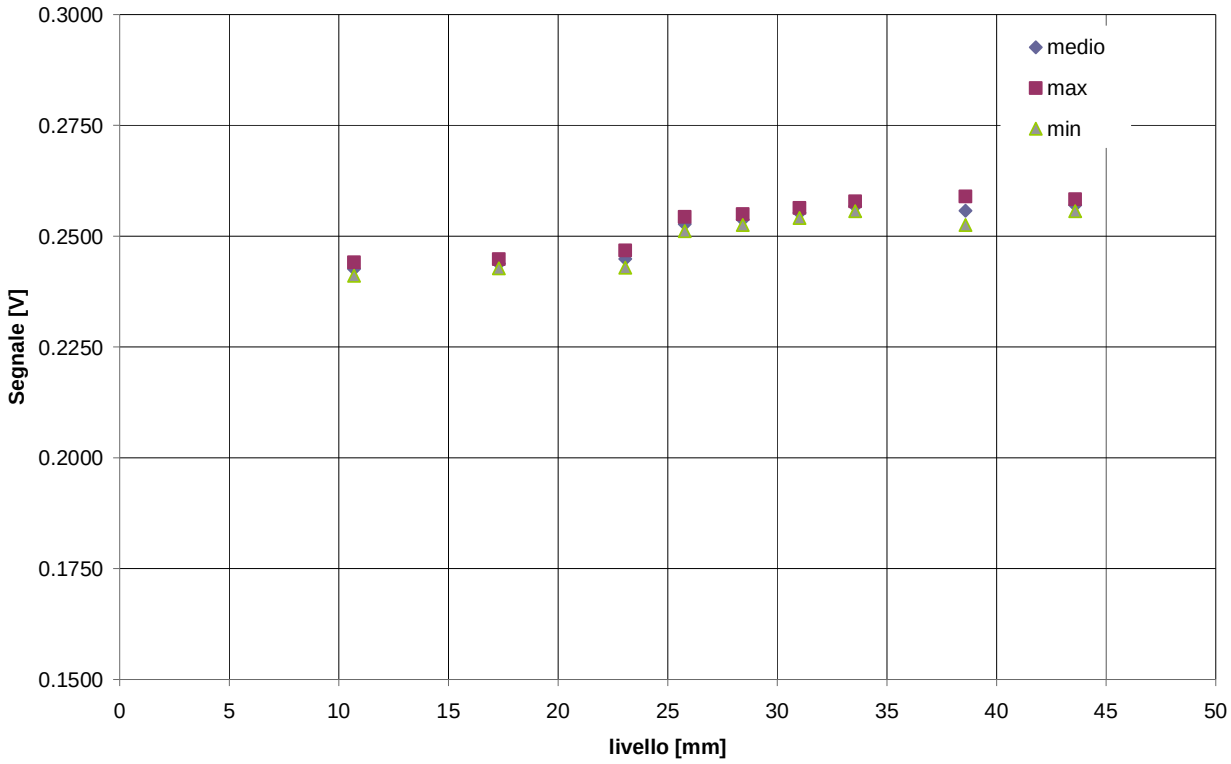


Fig. 47 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 6

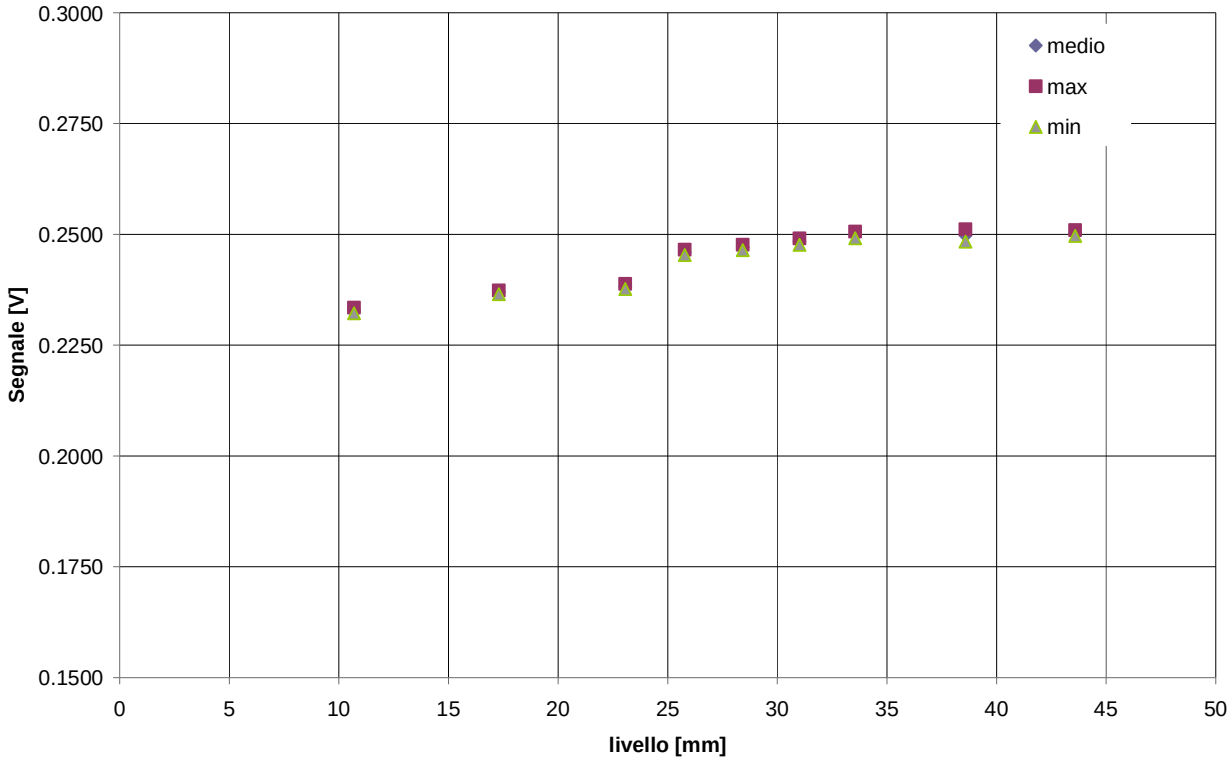


Fig. 48 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 7

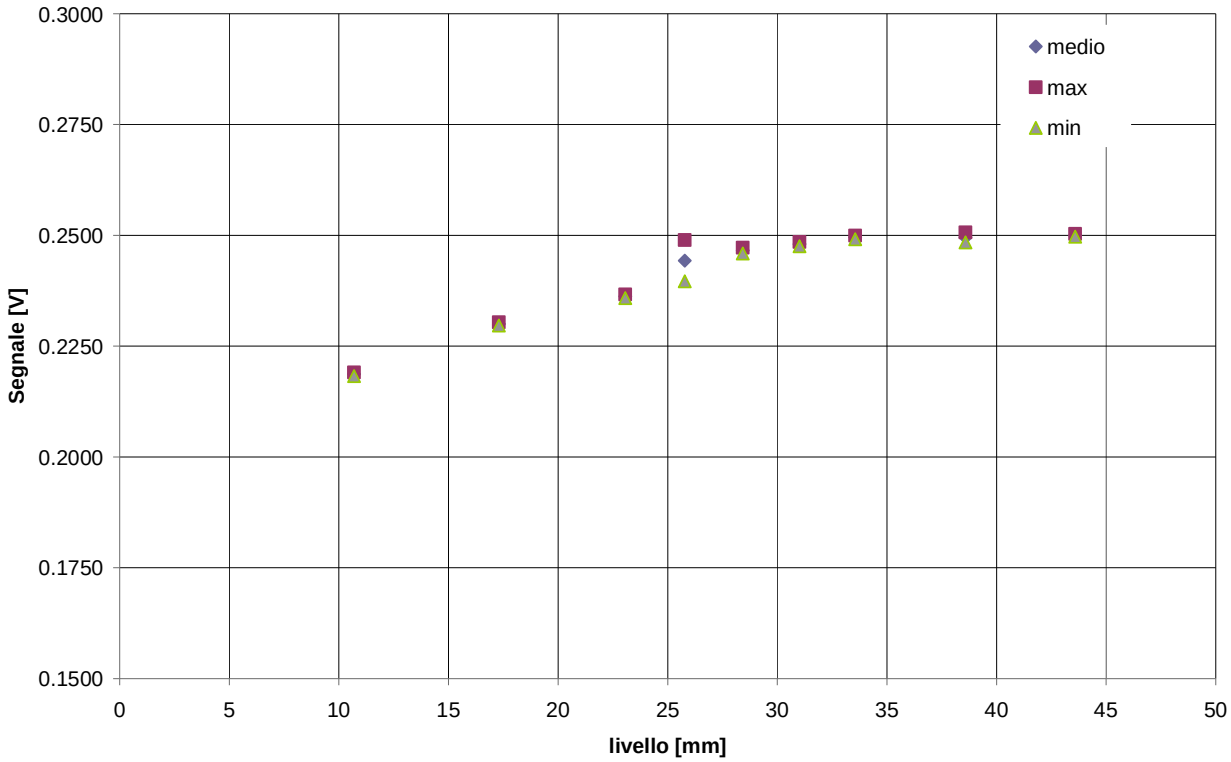


Fig. 49 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 8

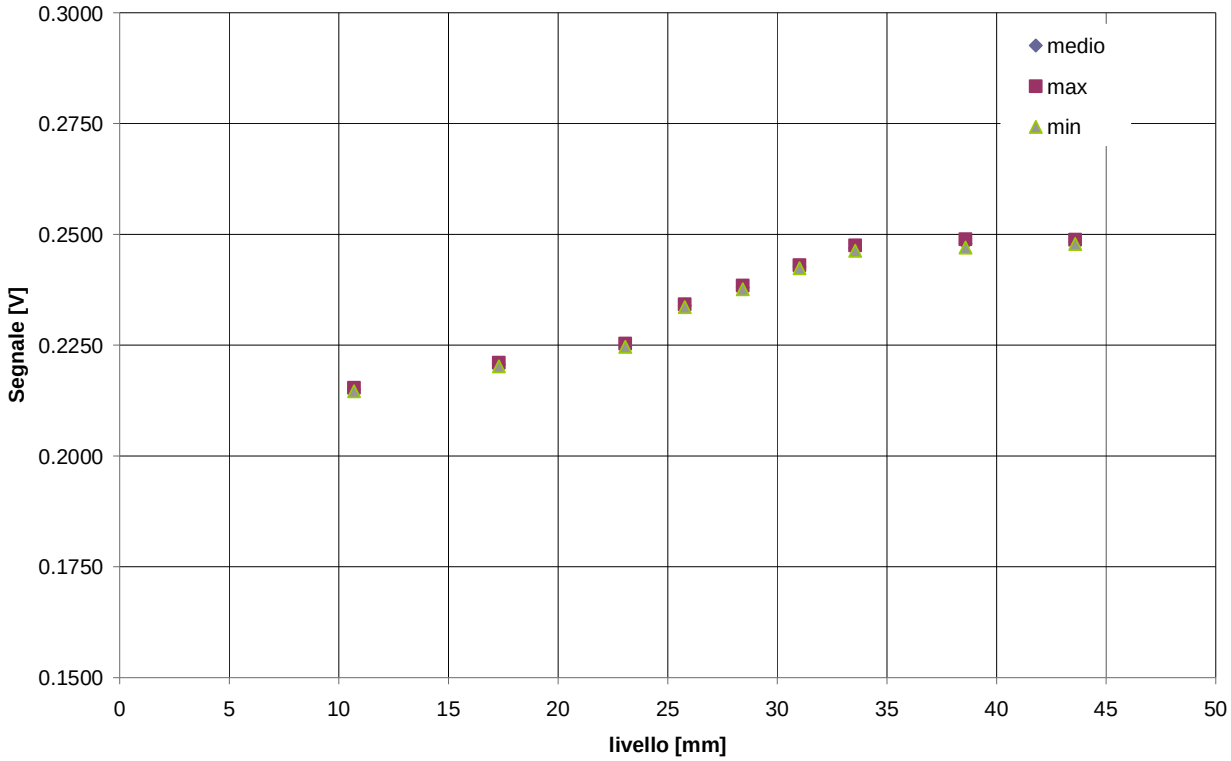


Fig. 50 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 9

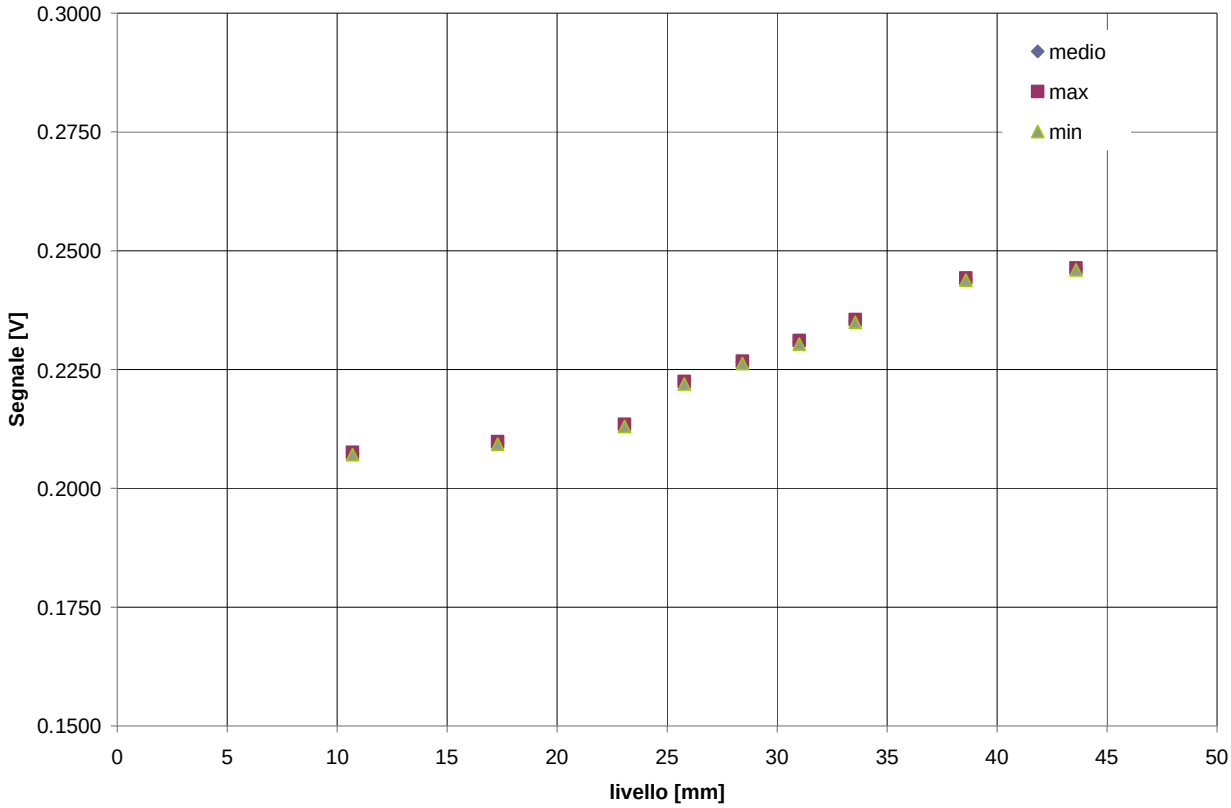


Fig. 51 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 1

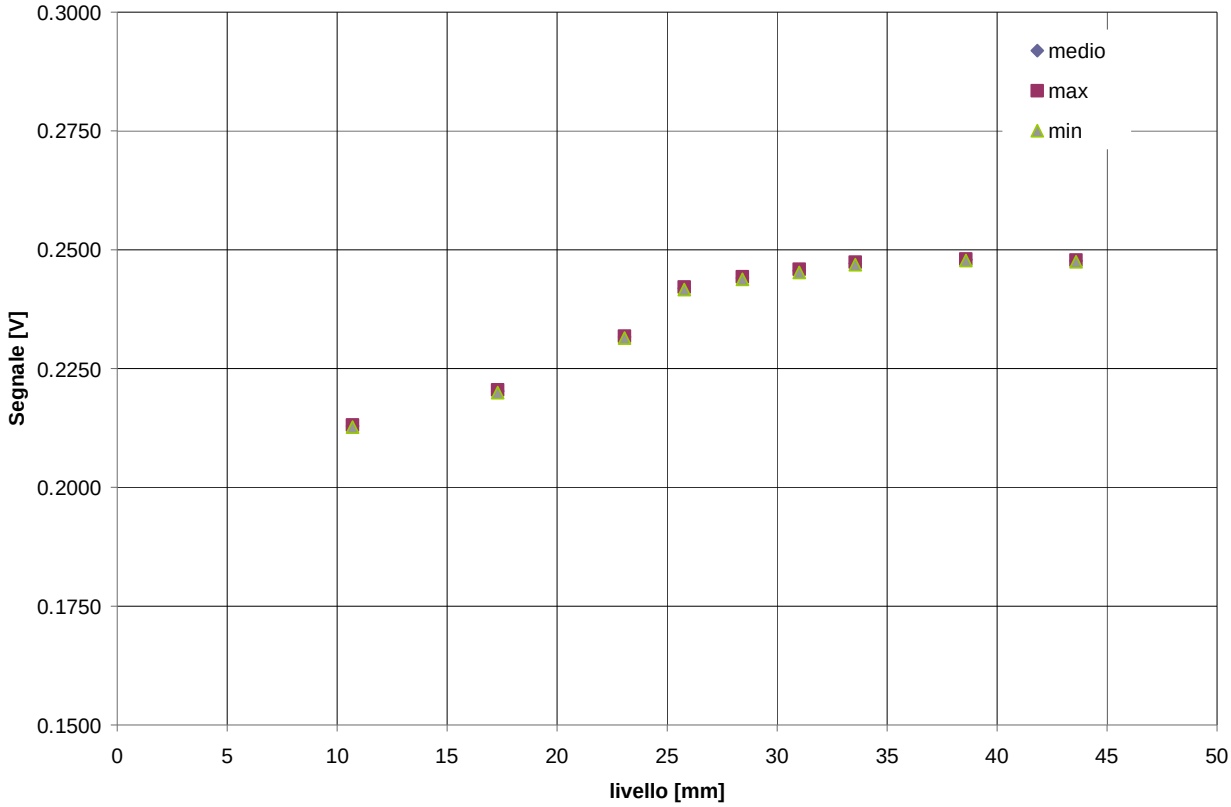


Fig. 52 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 2

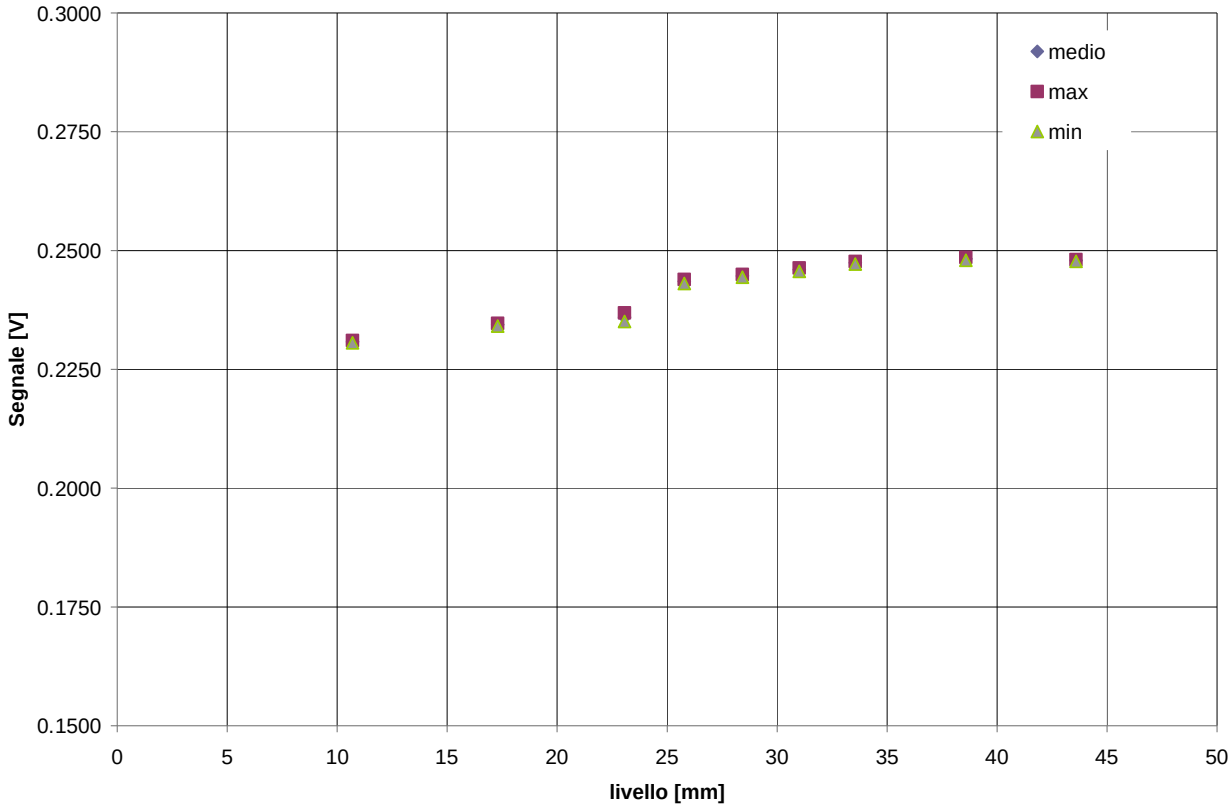


Fig. 53 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 3

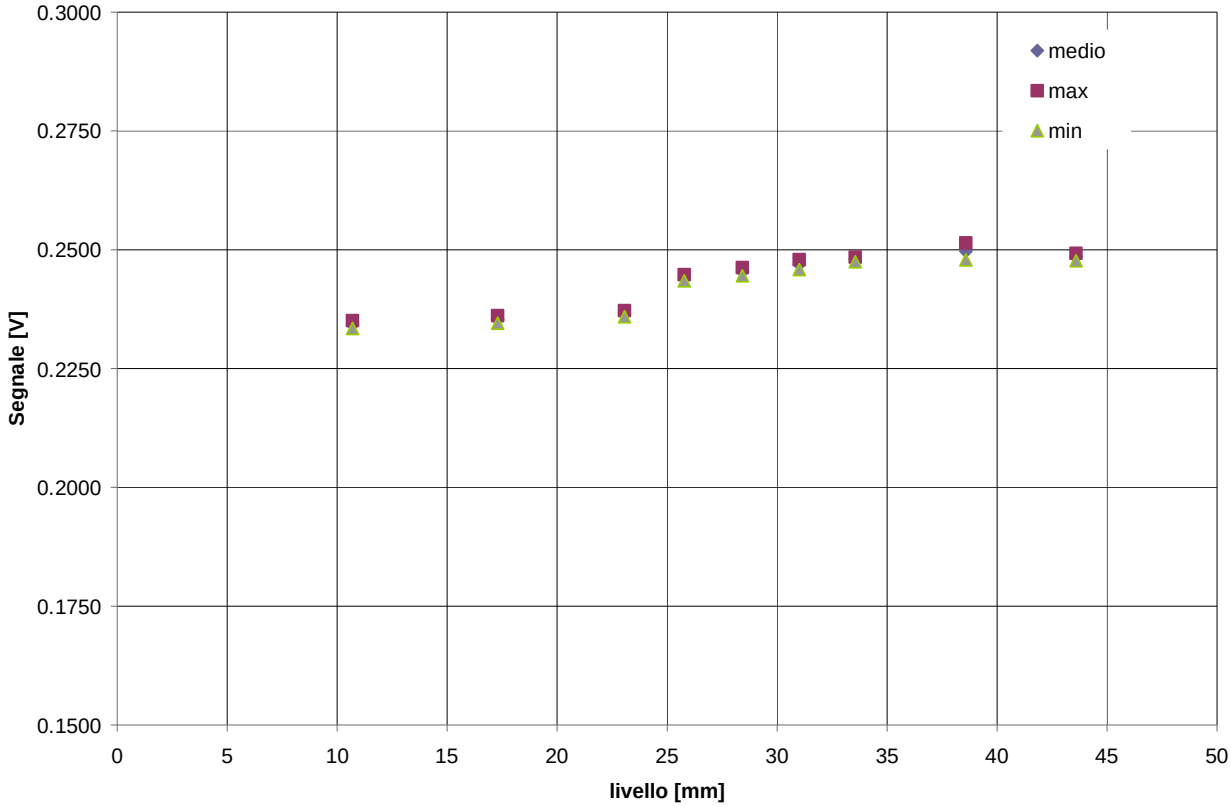


Fig. 54 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 4

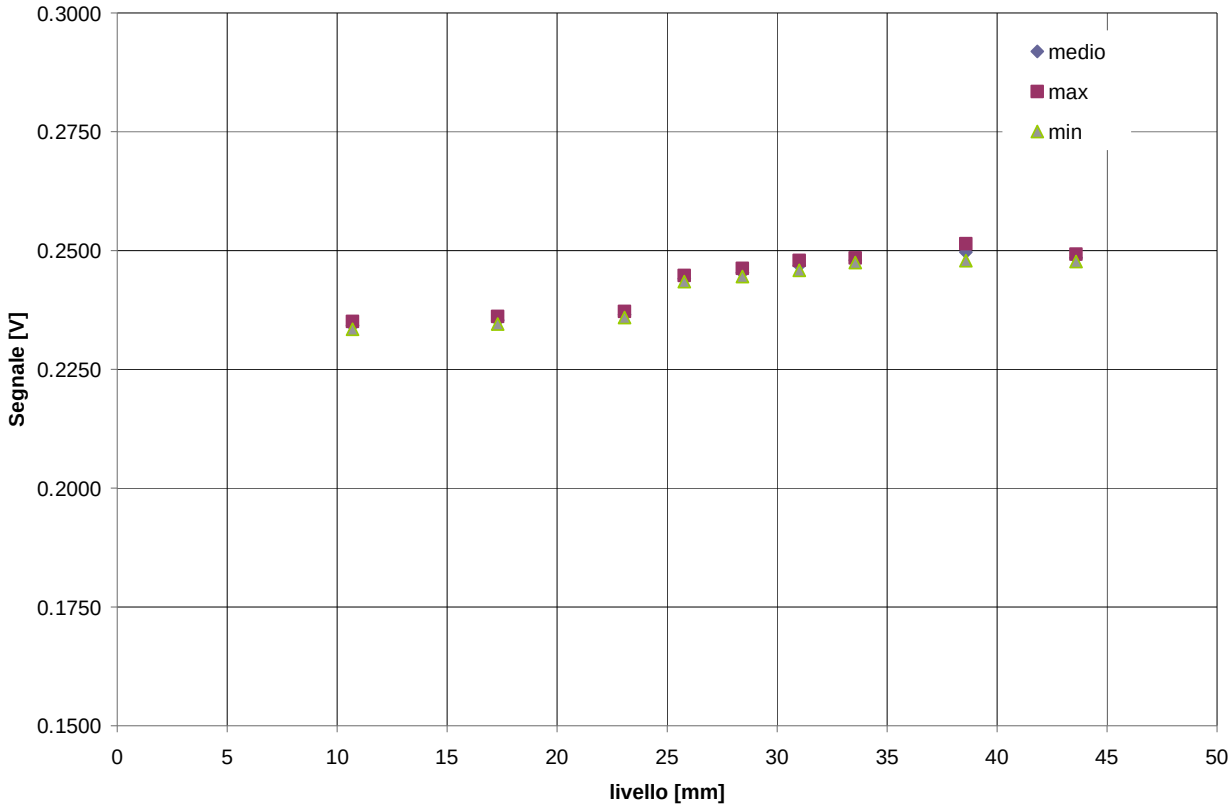


Fig. 55 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 5

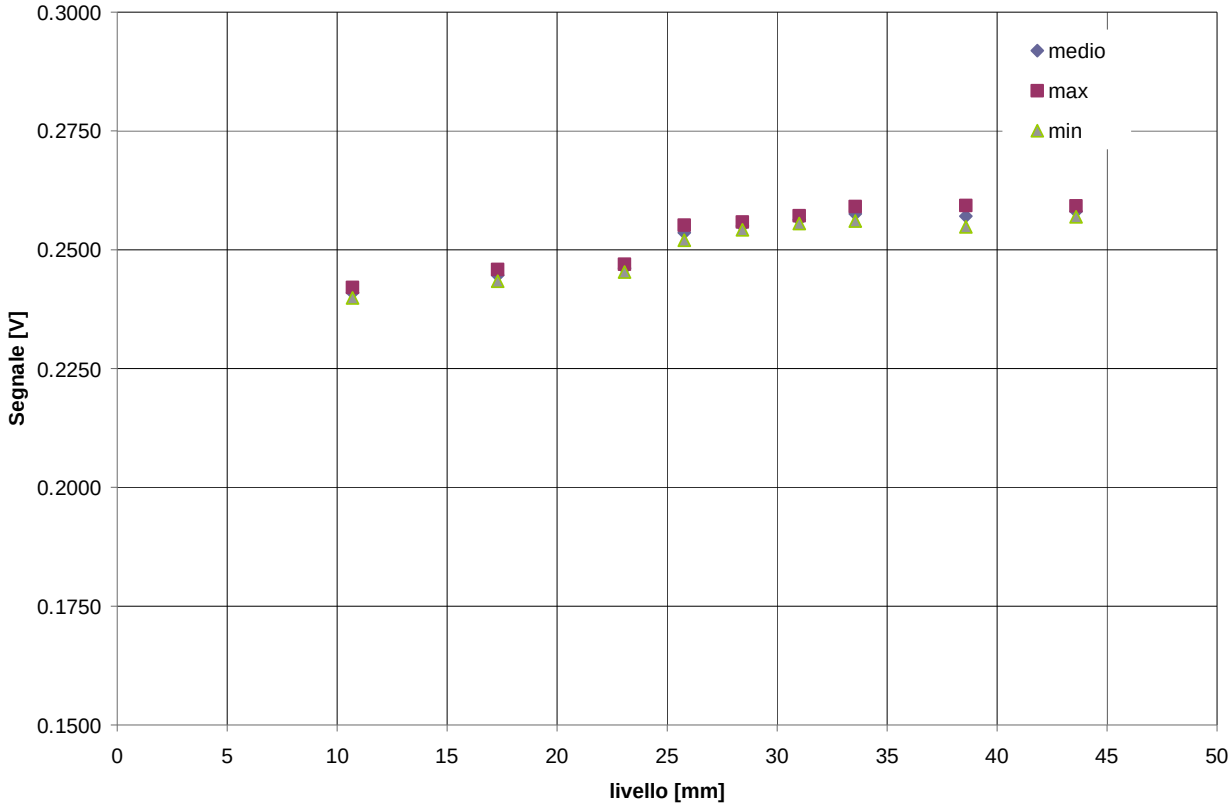


Fig. 56 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 7

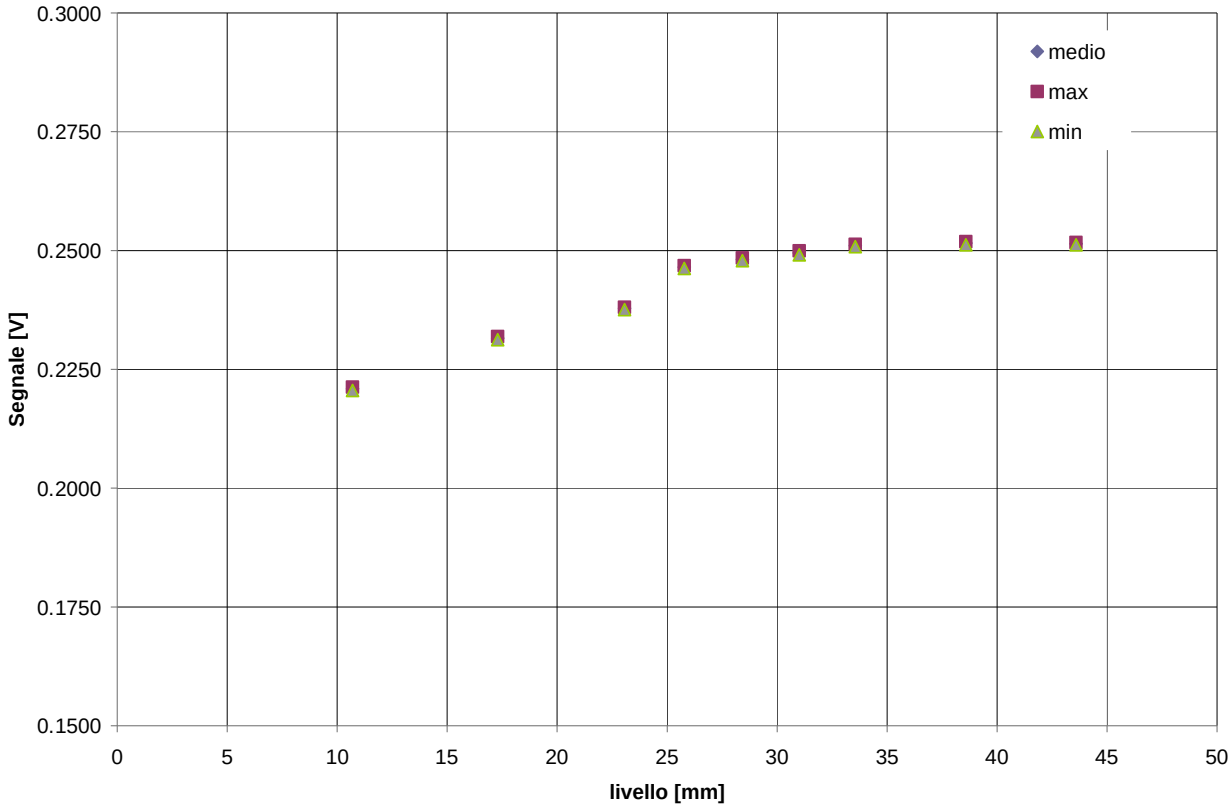


Fig. 57 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 8

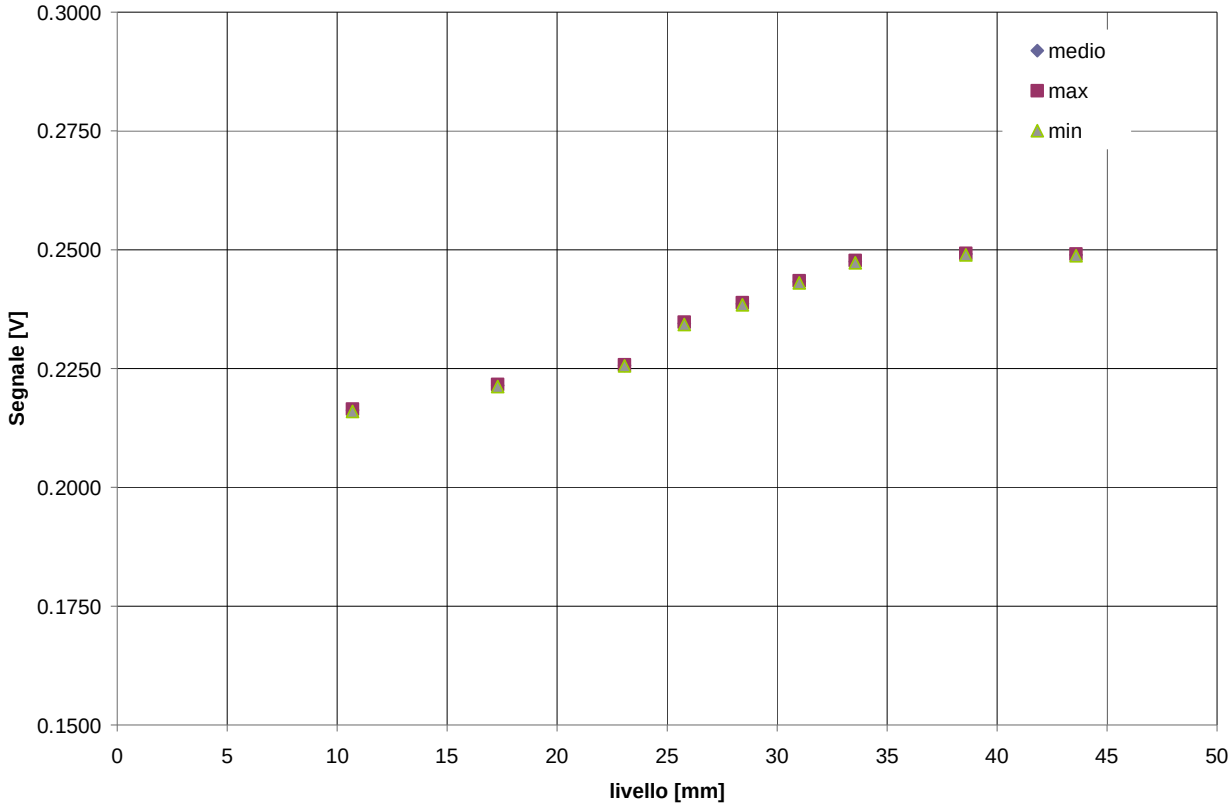


Fig. 58 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 9

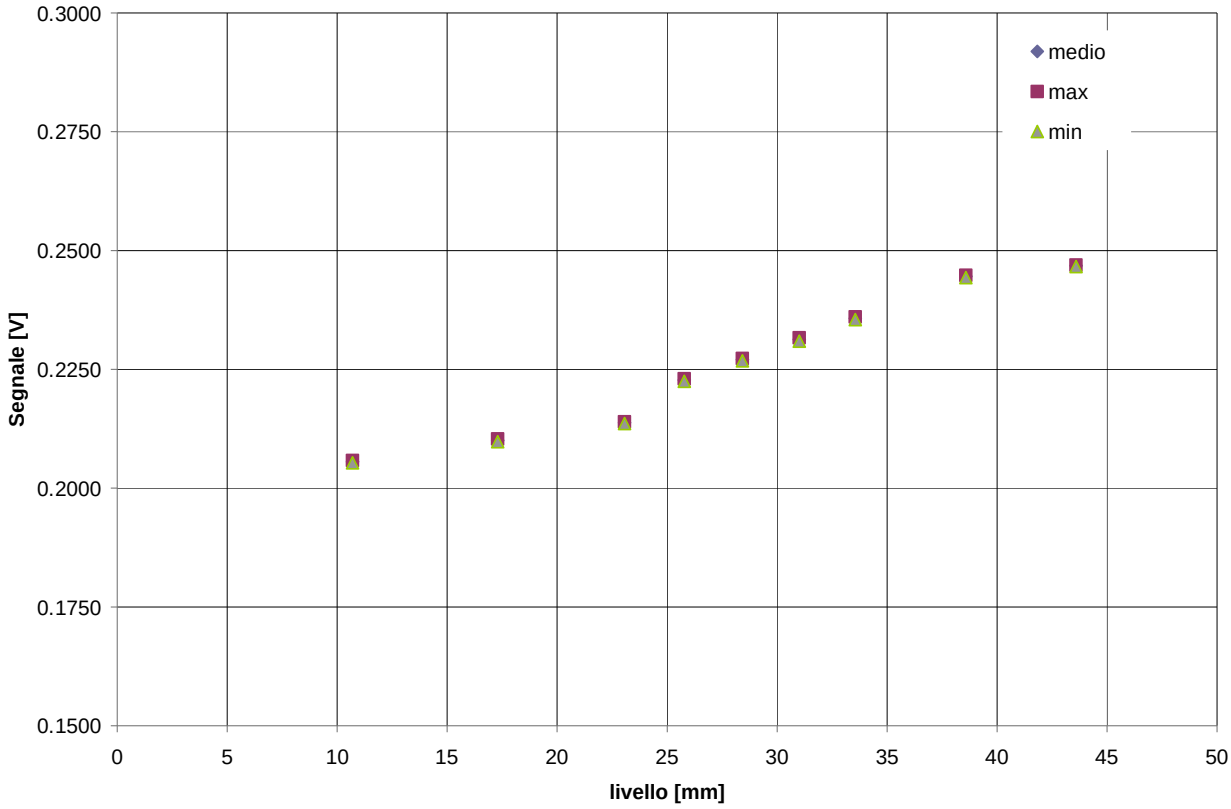


Fig. 59 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 1

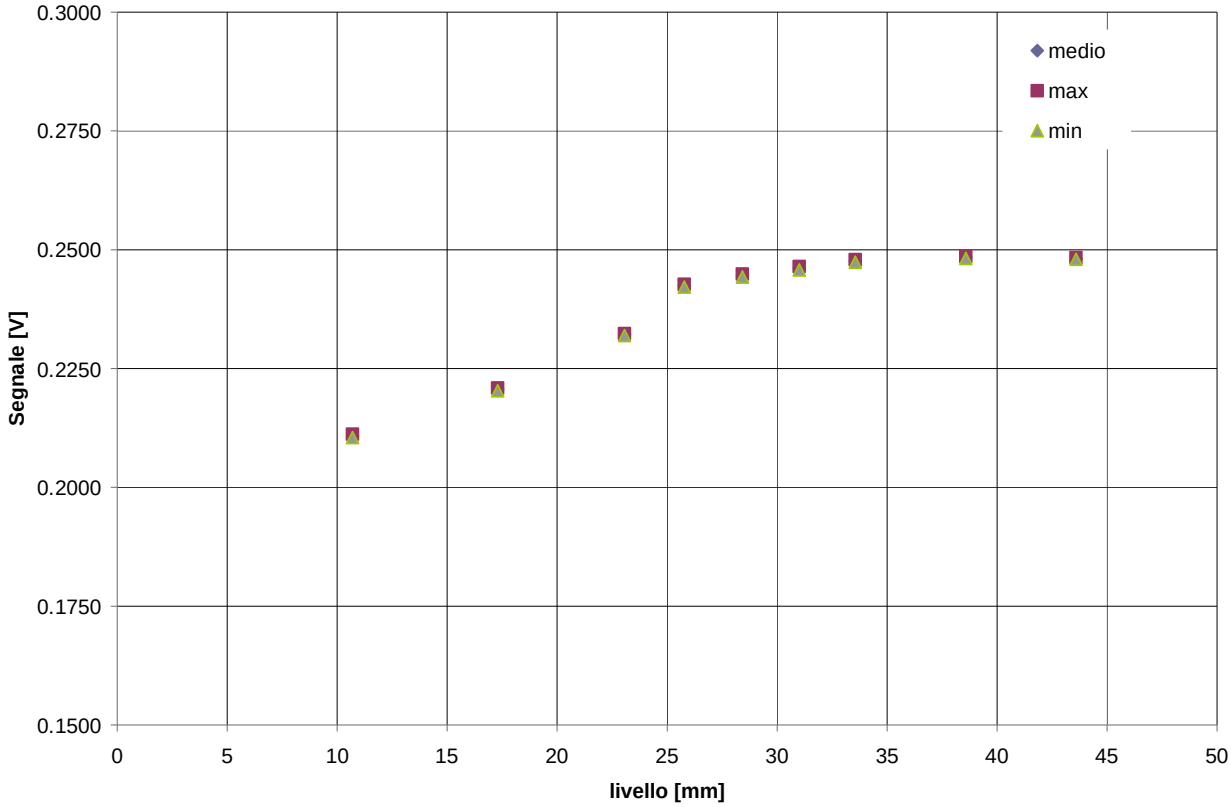


Fig. 60 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 2

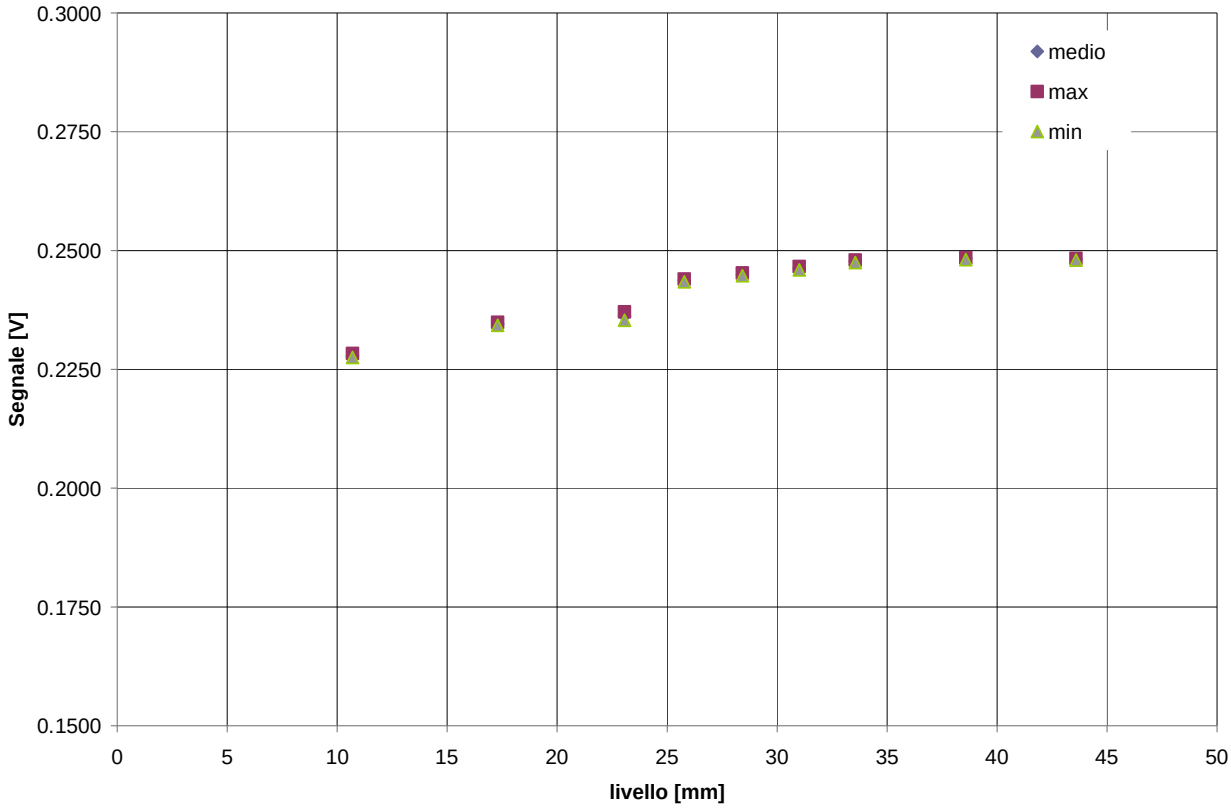


Fig. 61 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 3

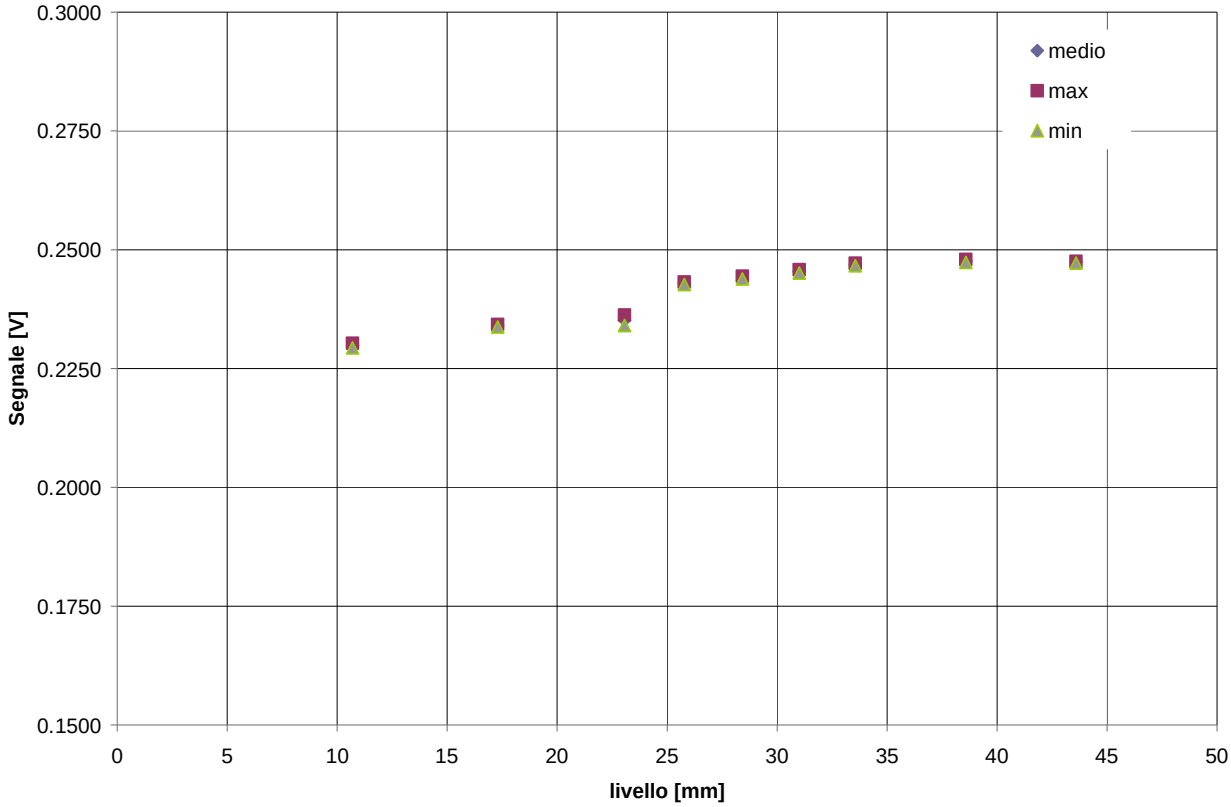


Fig. 62 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 4

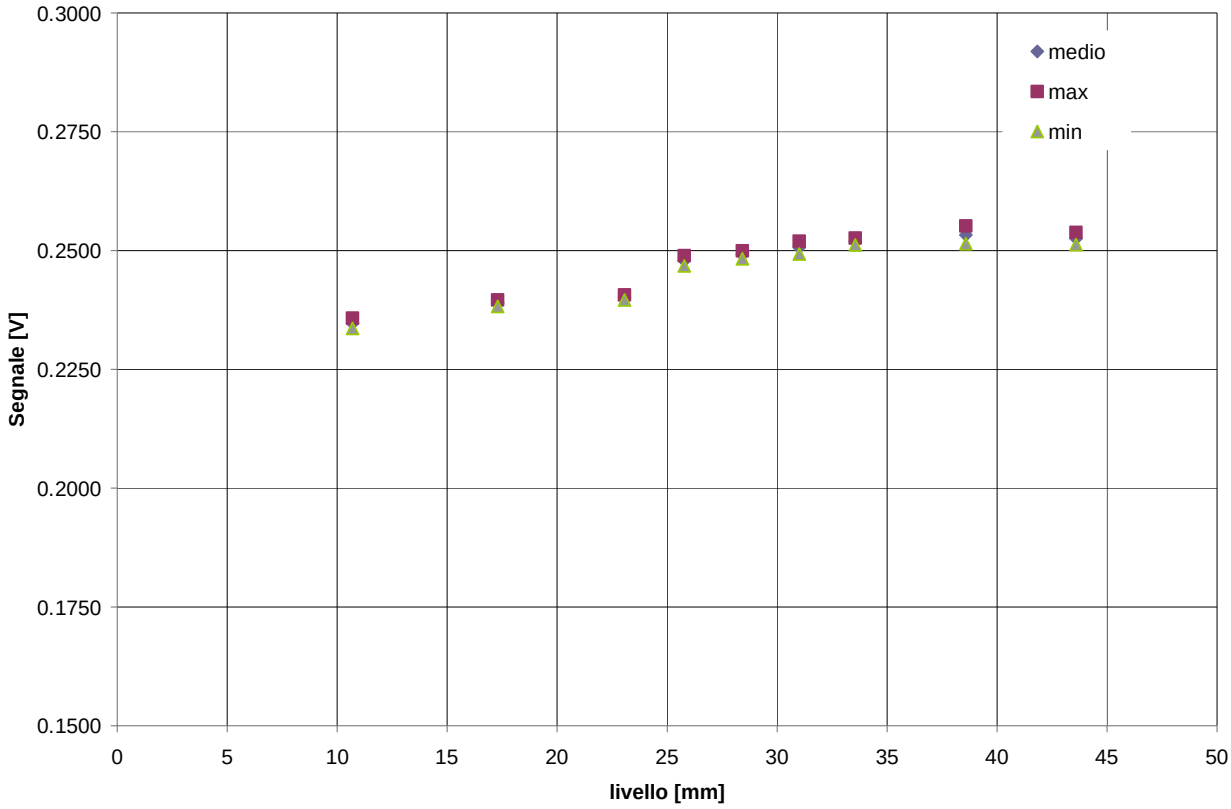


Fig. 63 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 5

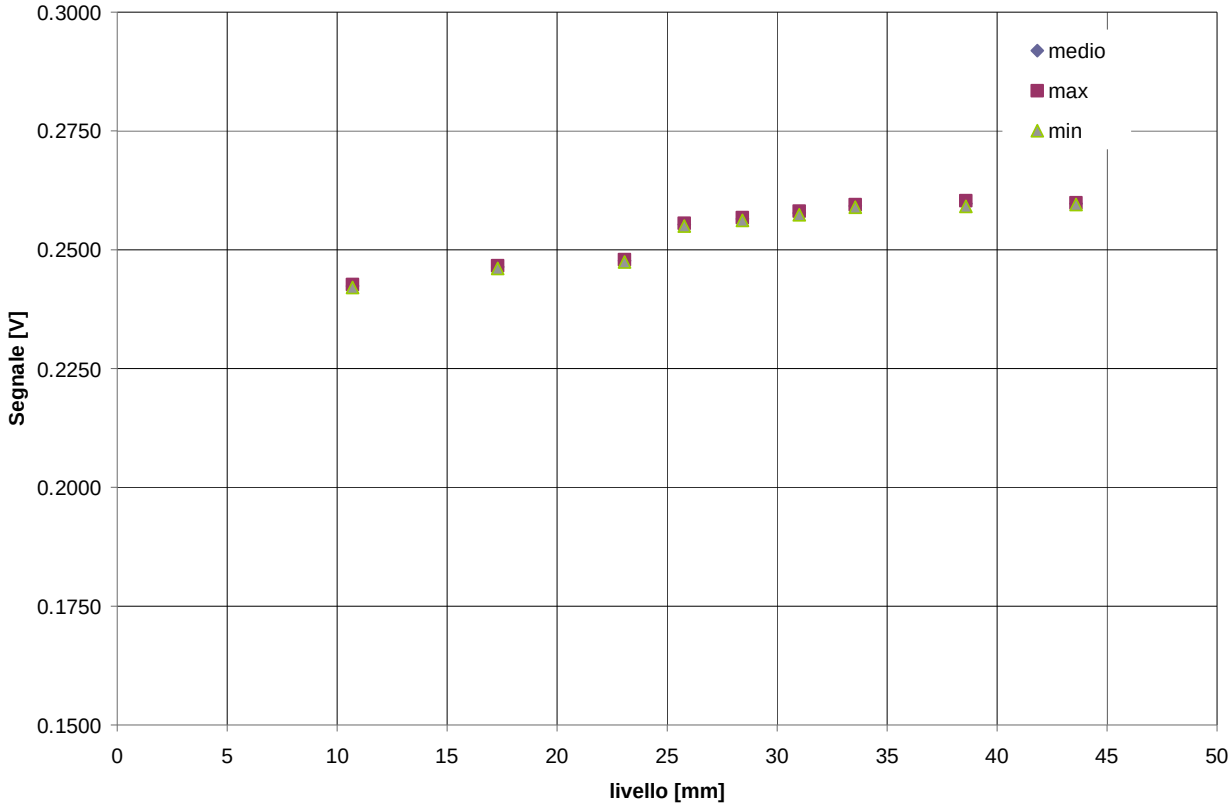


Fig. 64 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 6

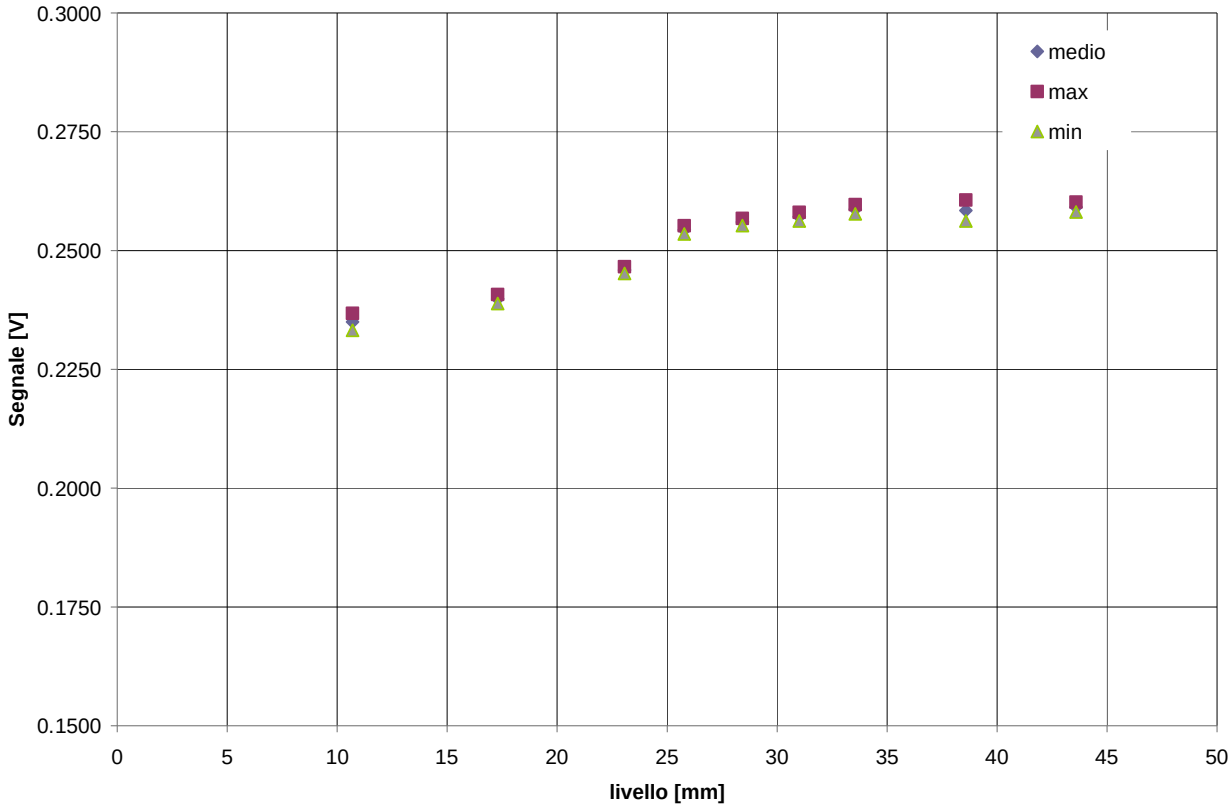


Fig. 65 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 8

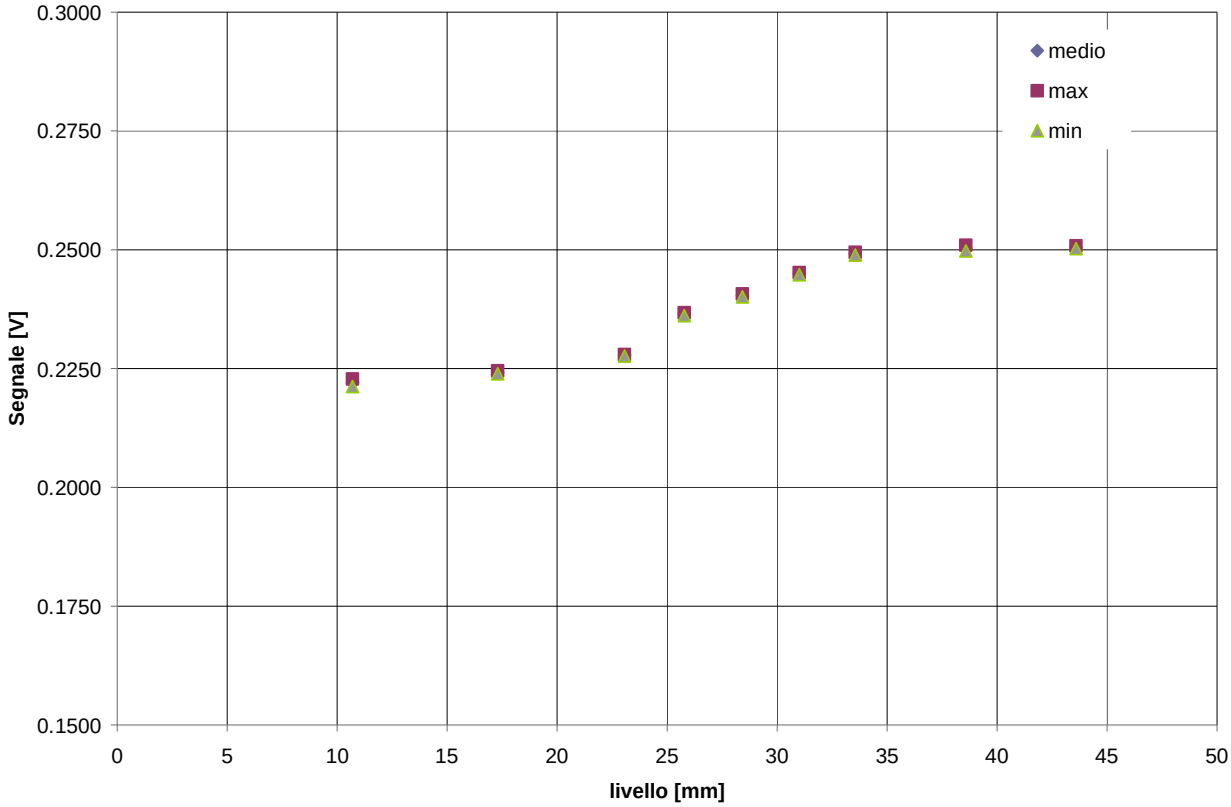


Fig. 66 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 9

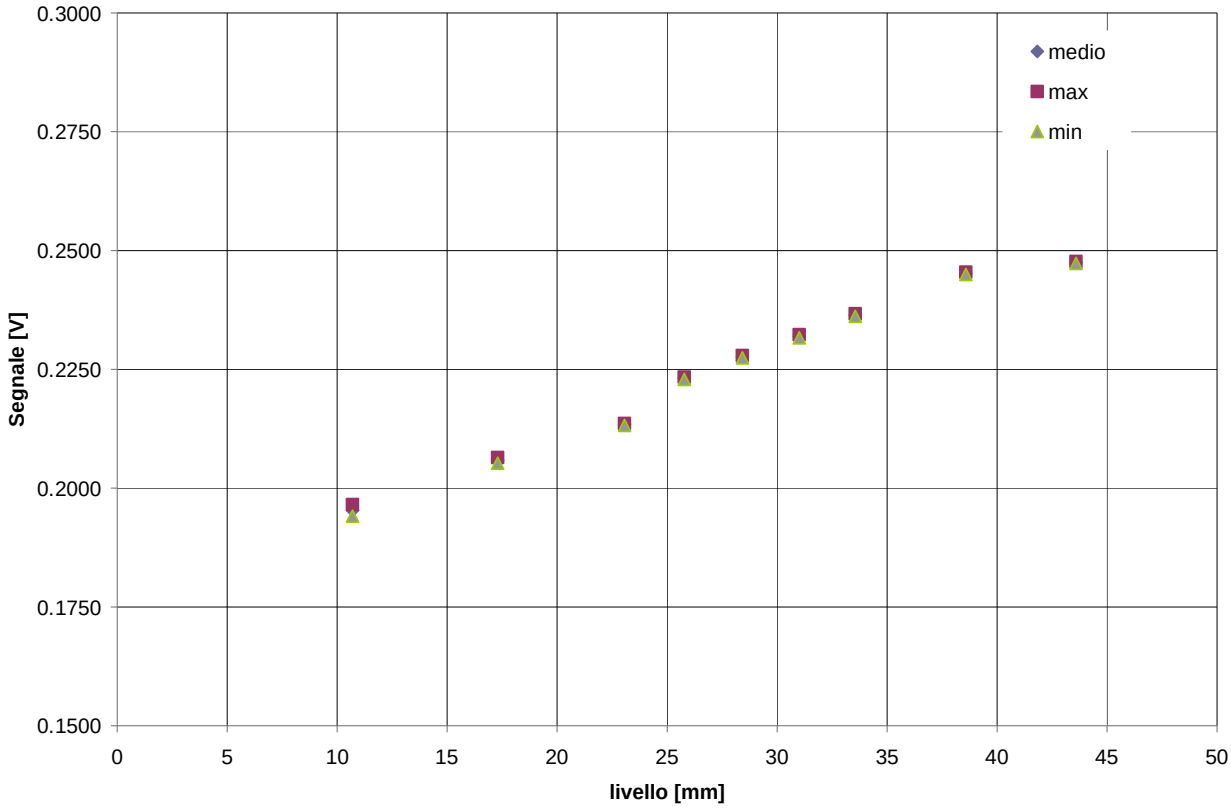


Fig. 67 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 1

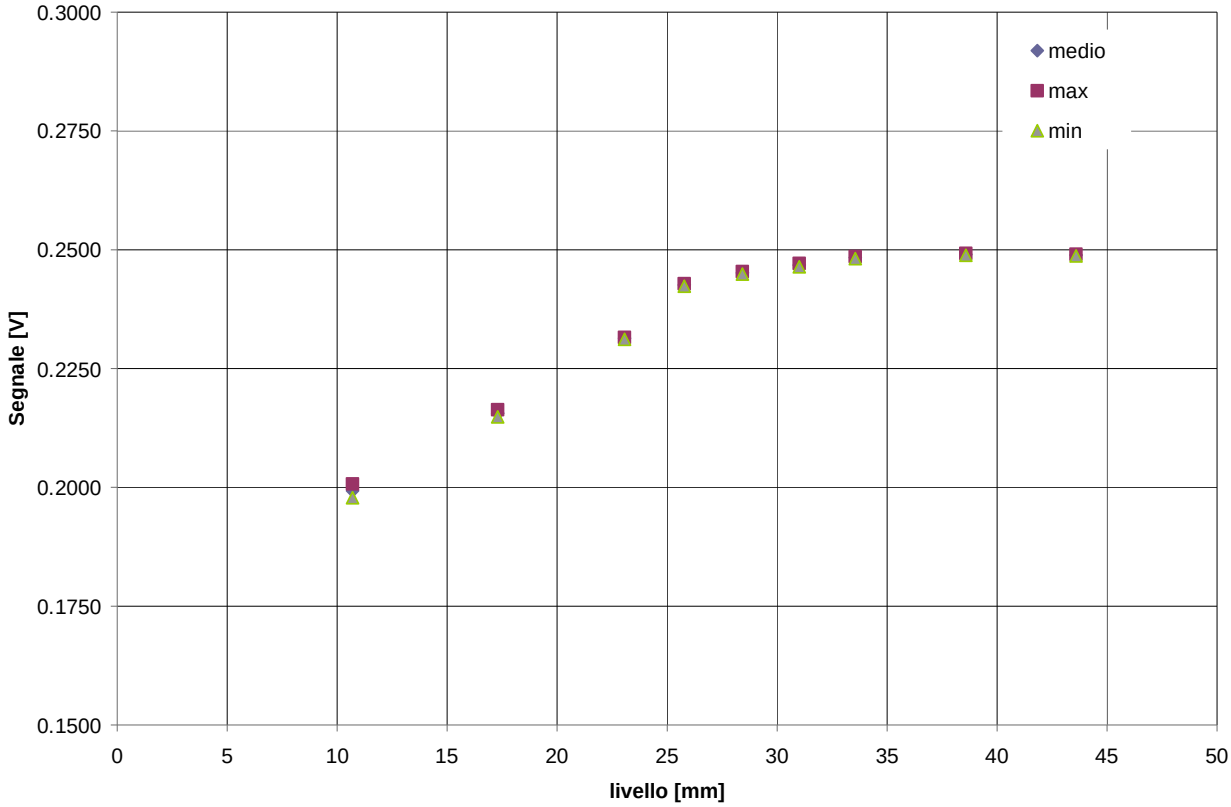


Fig. 68 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 2

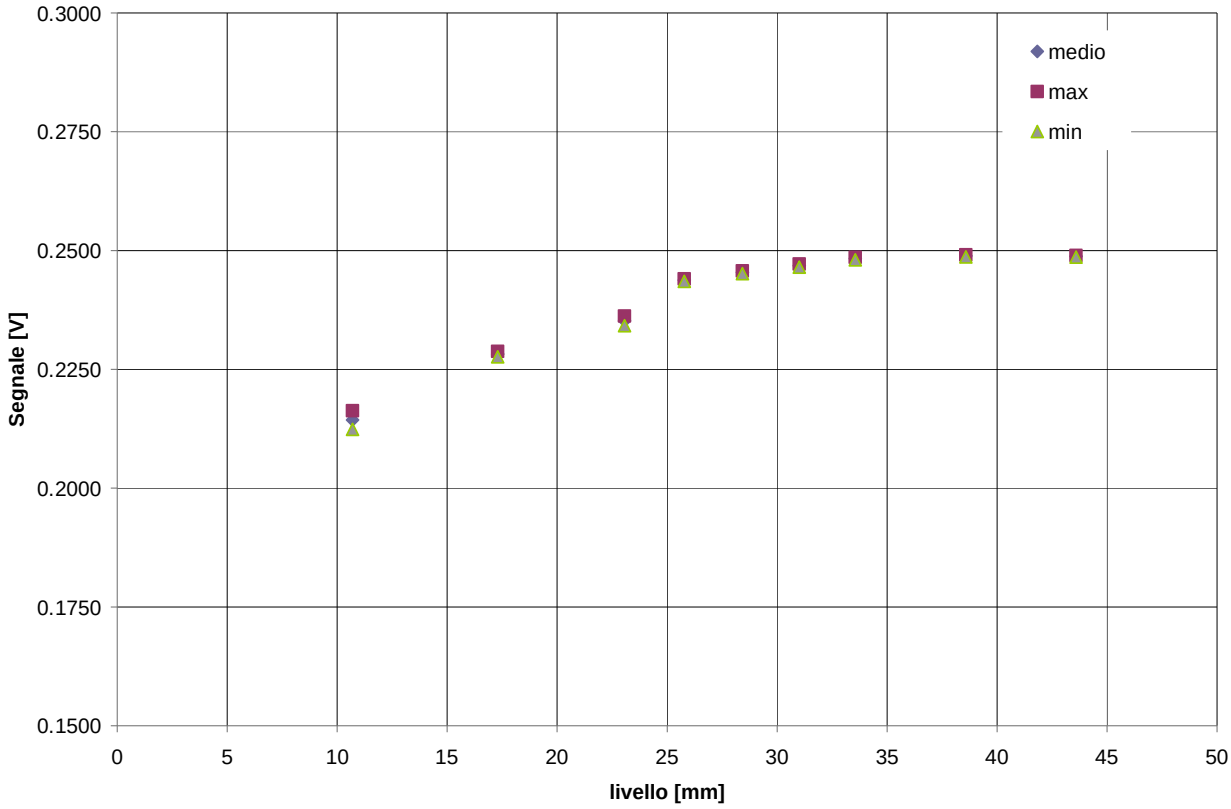


Fig. 69 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 3

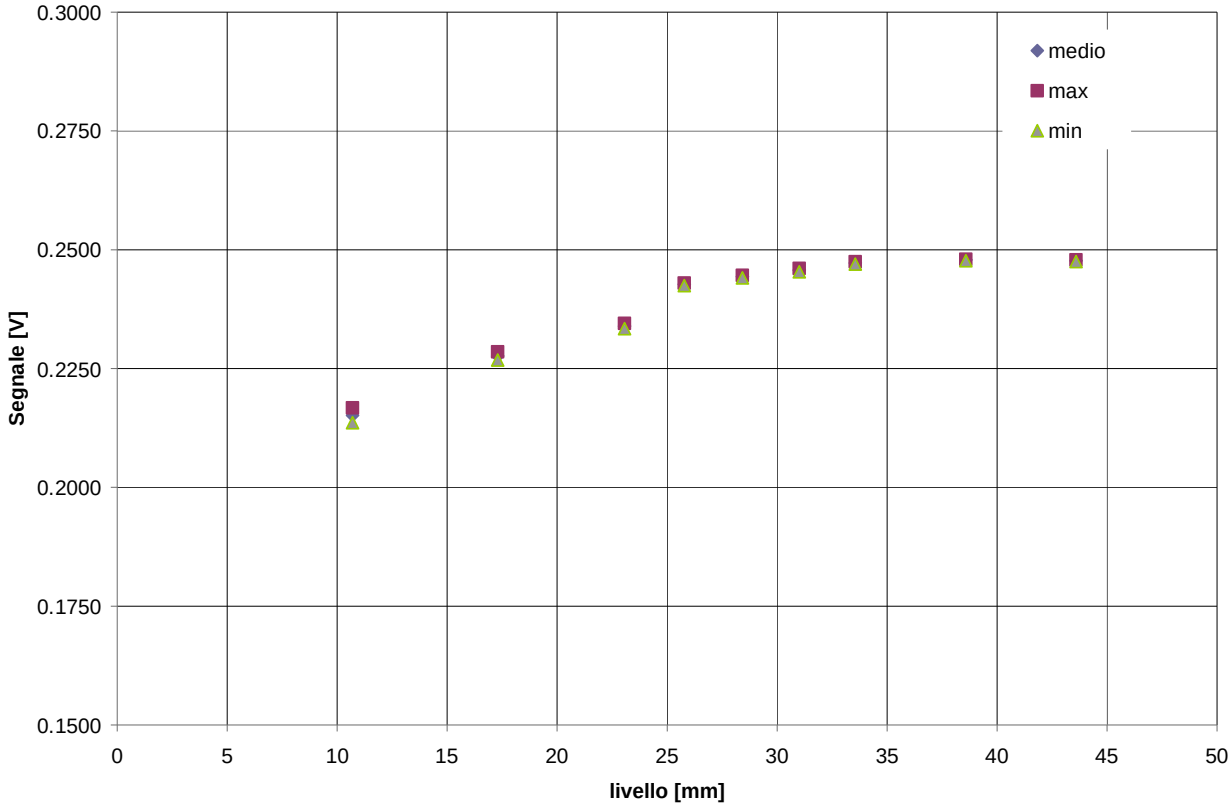


Fig. 70 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 4

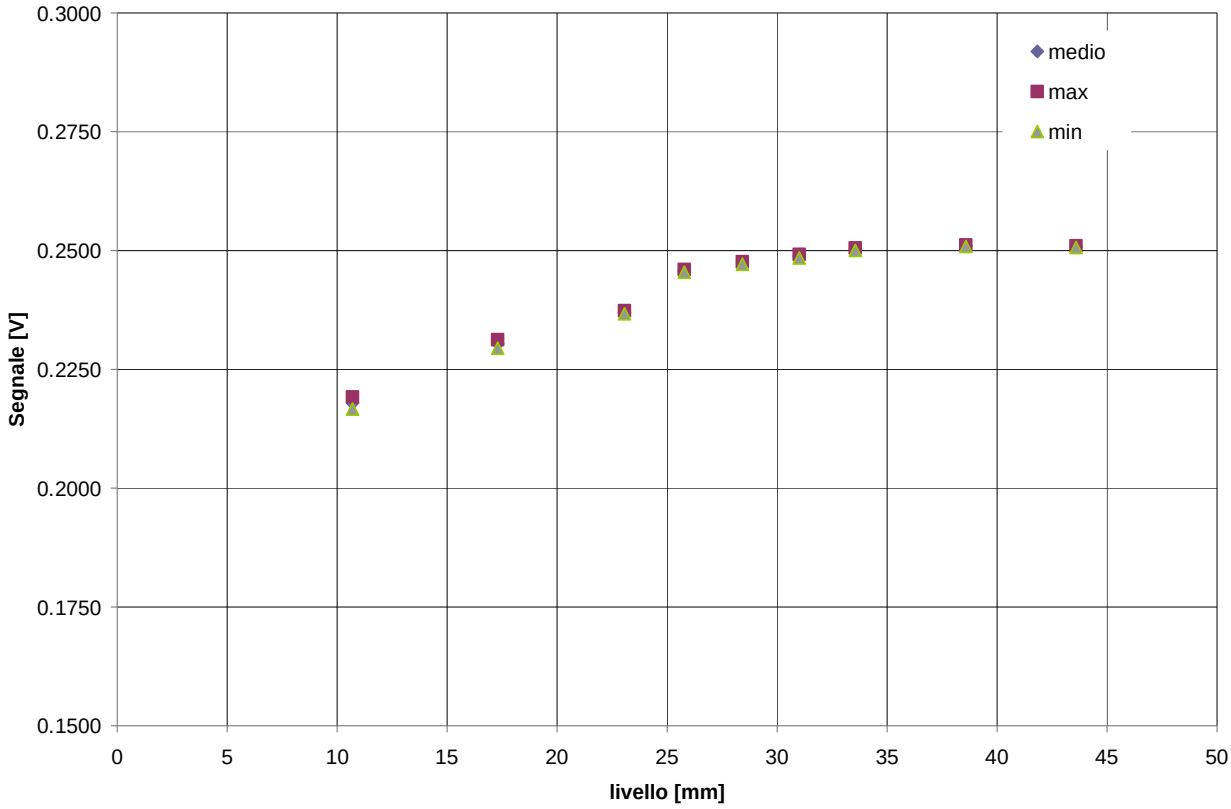


Fig. 71 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 5

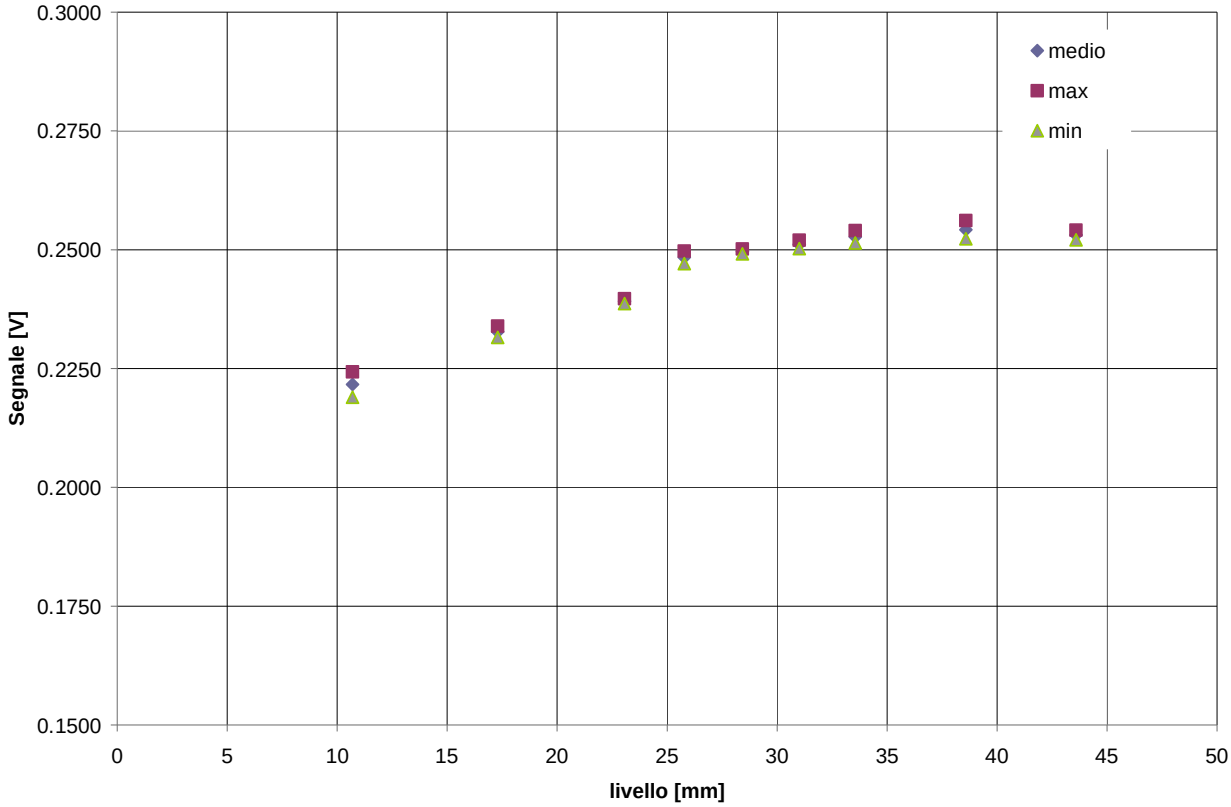


Fig. 72 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 6

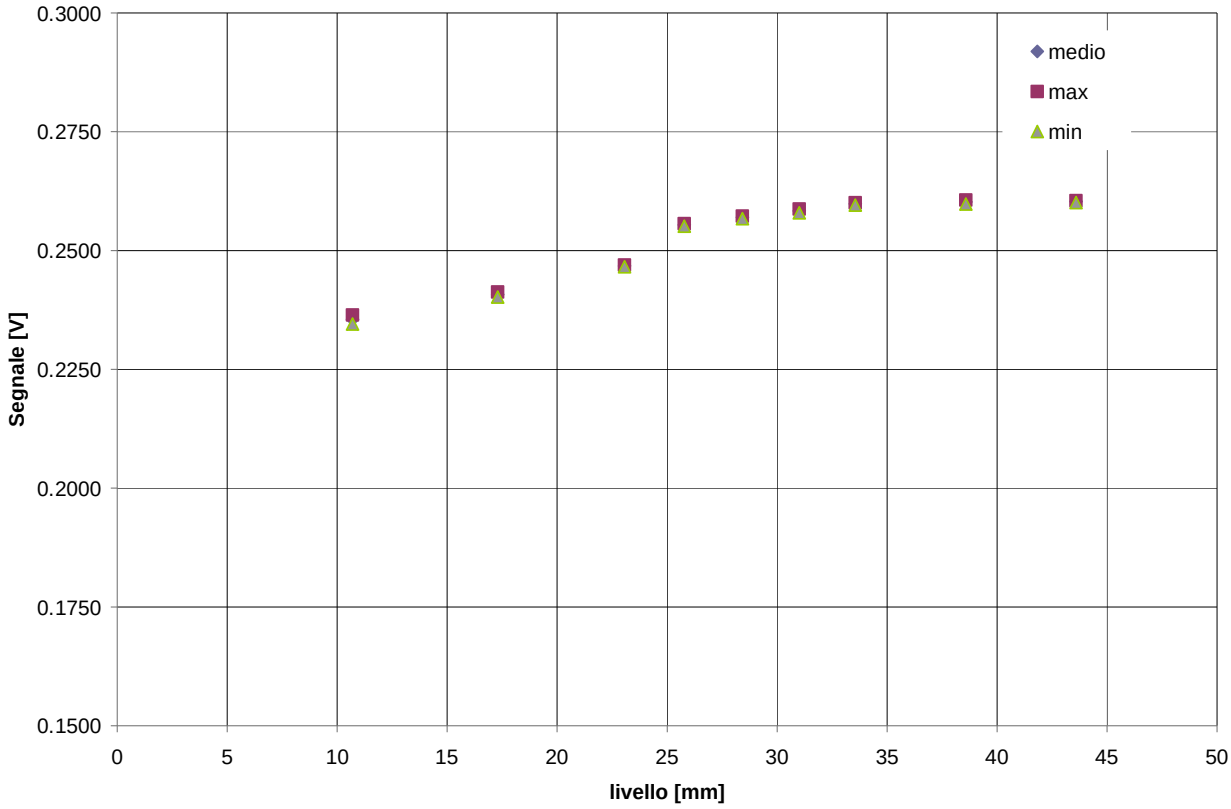


Fig. 73 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 7

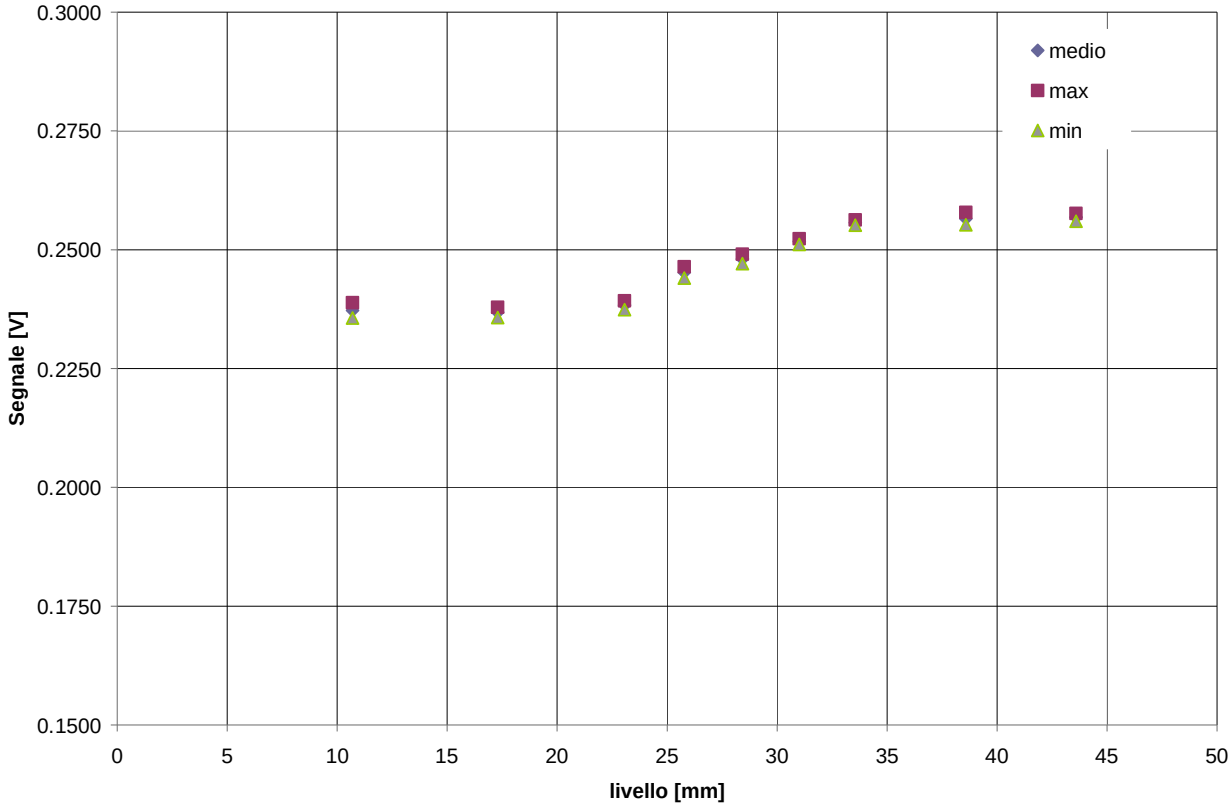


Fig. 74 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 9

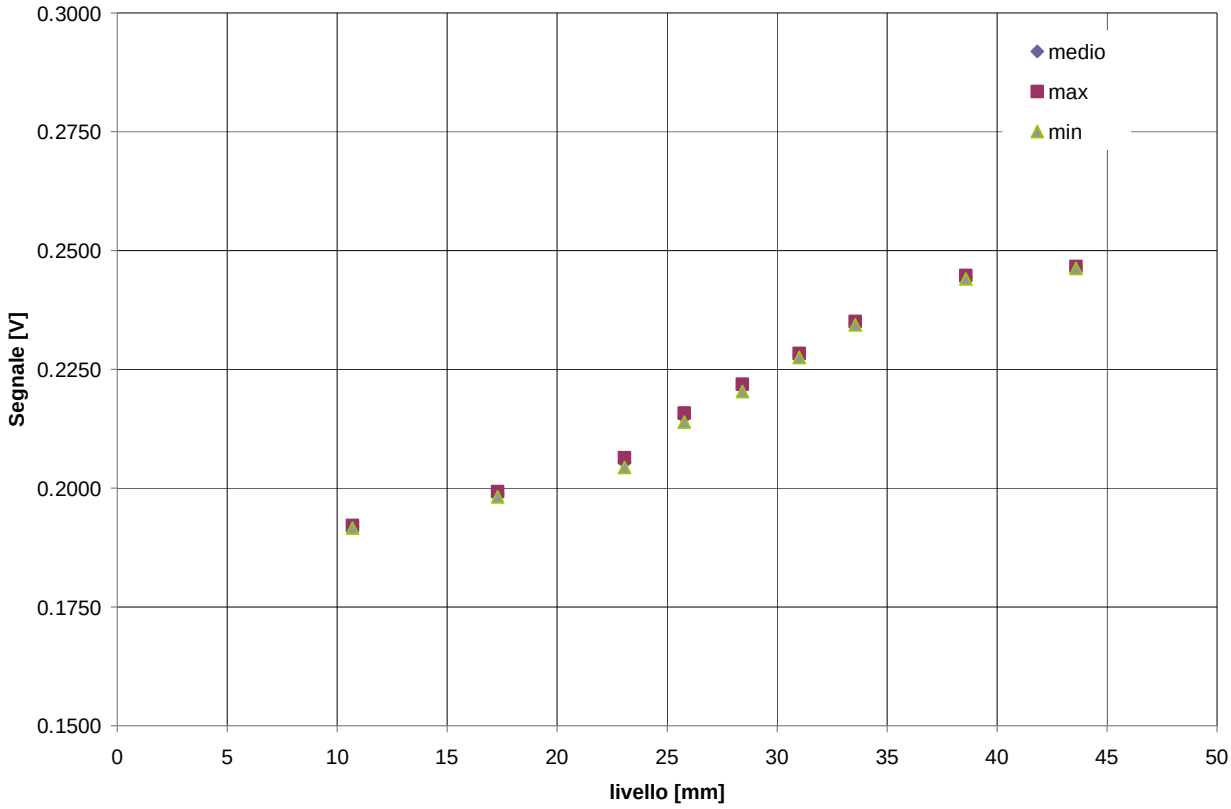


Fig. 75 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 1

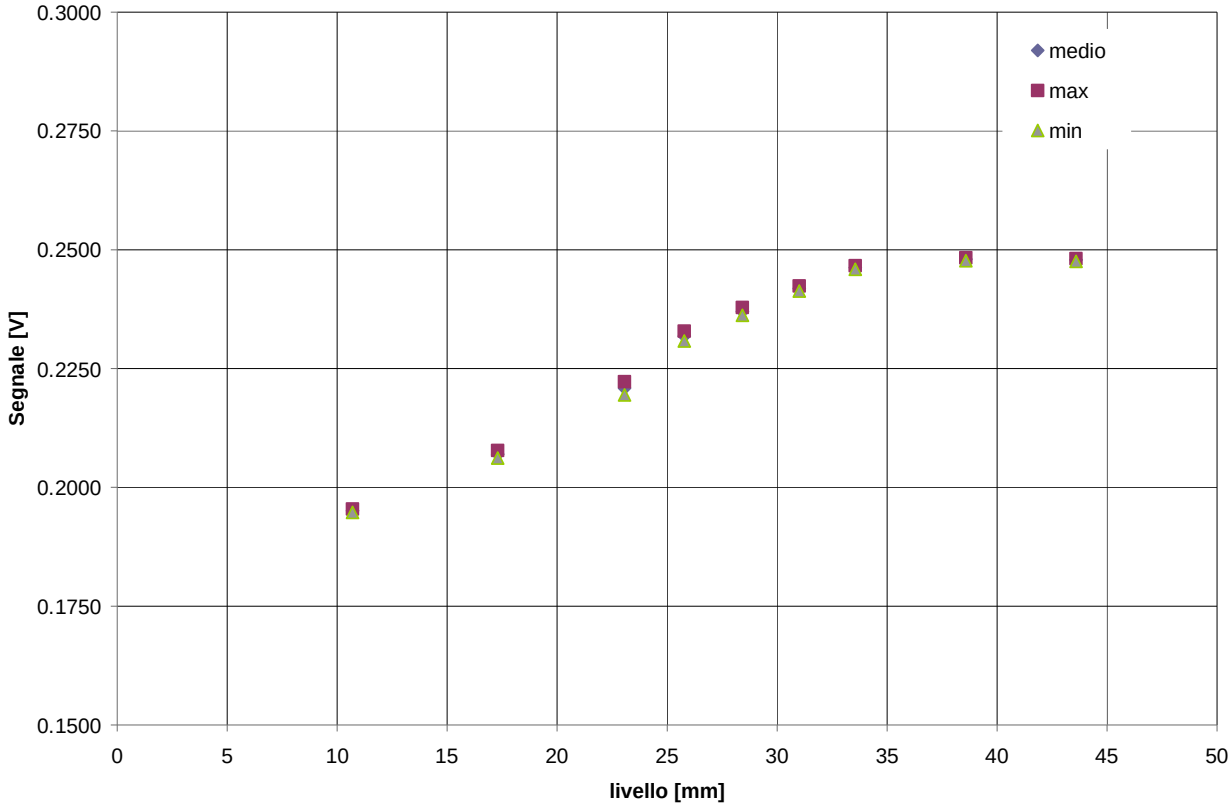


Fig. 76 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 2

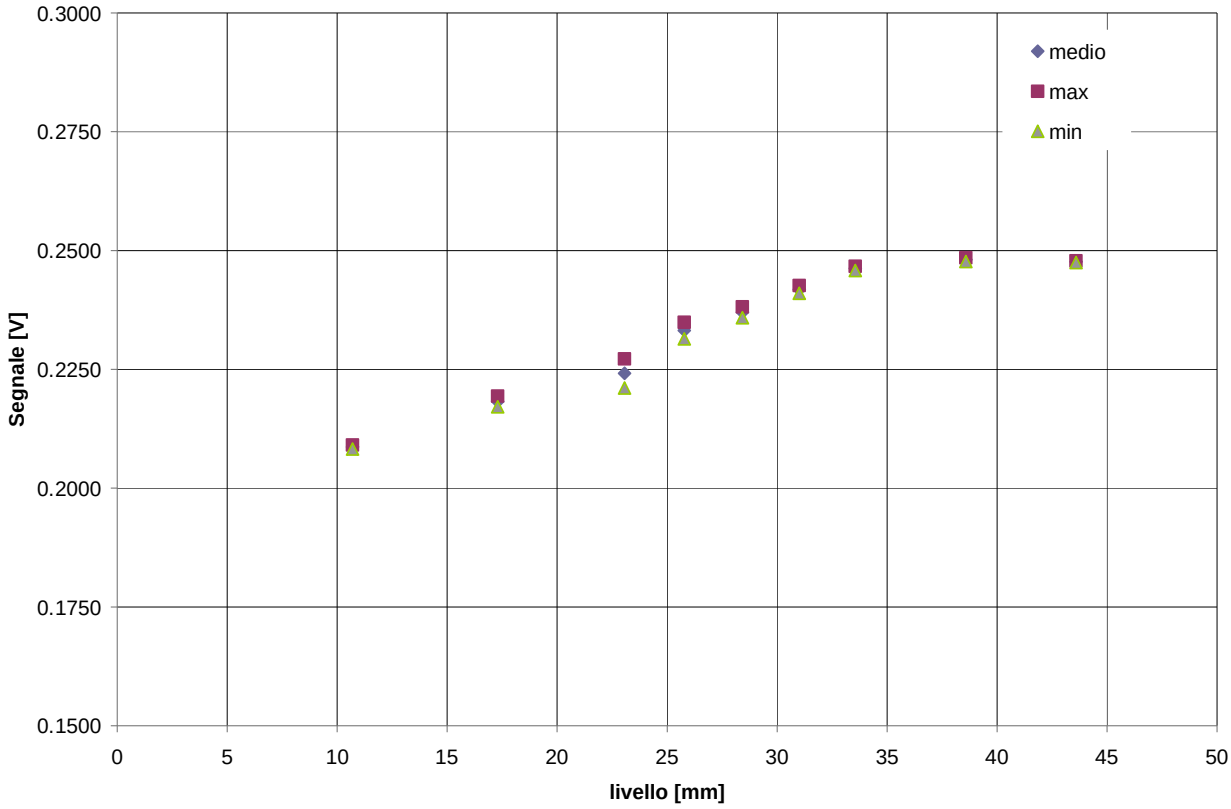


Fig. 77 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 3

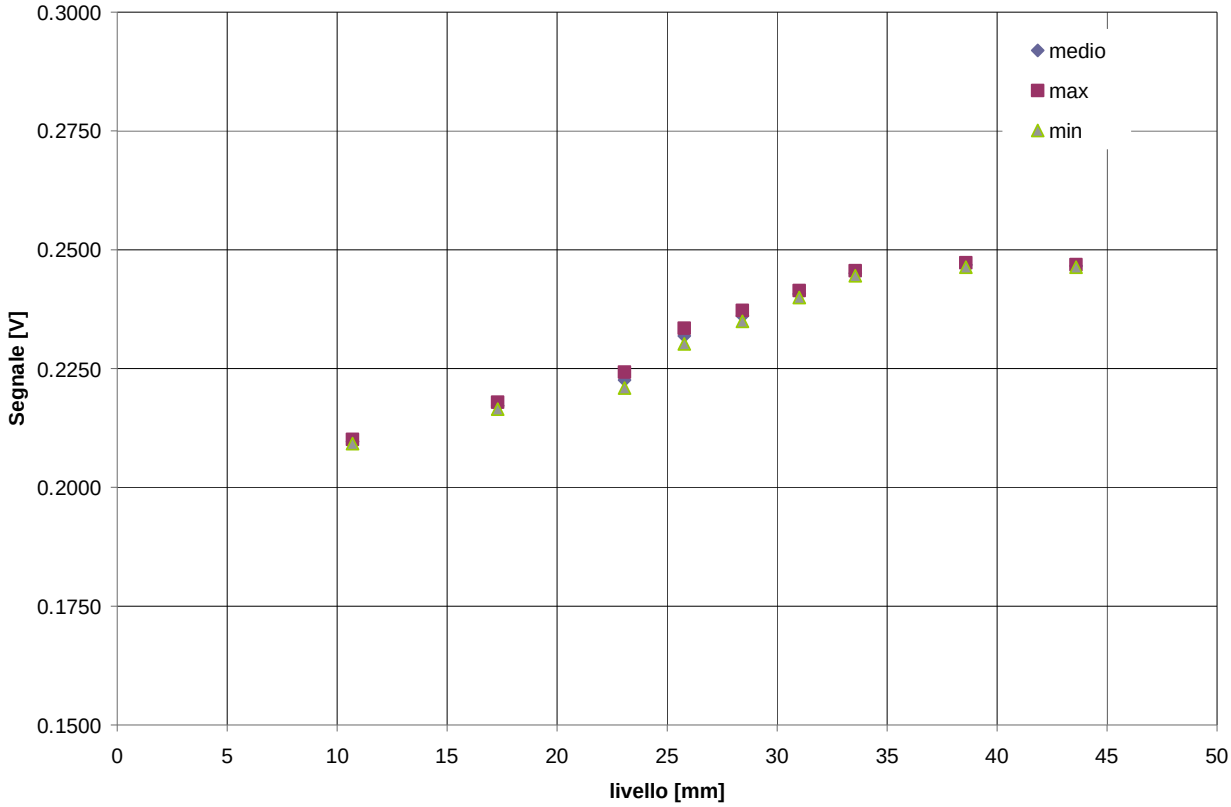


Fig. 78 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 4

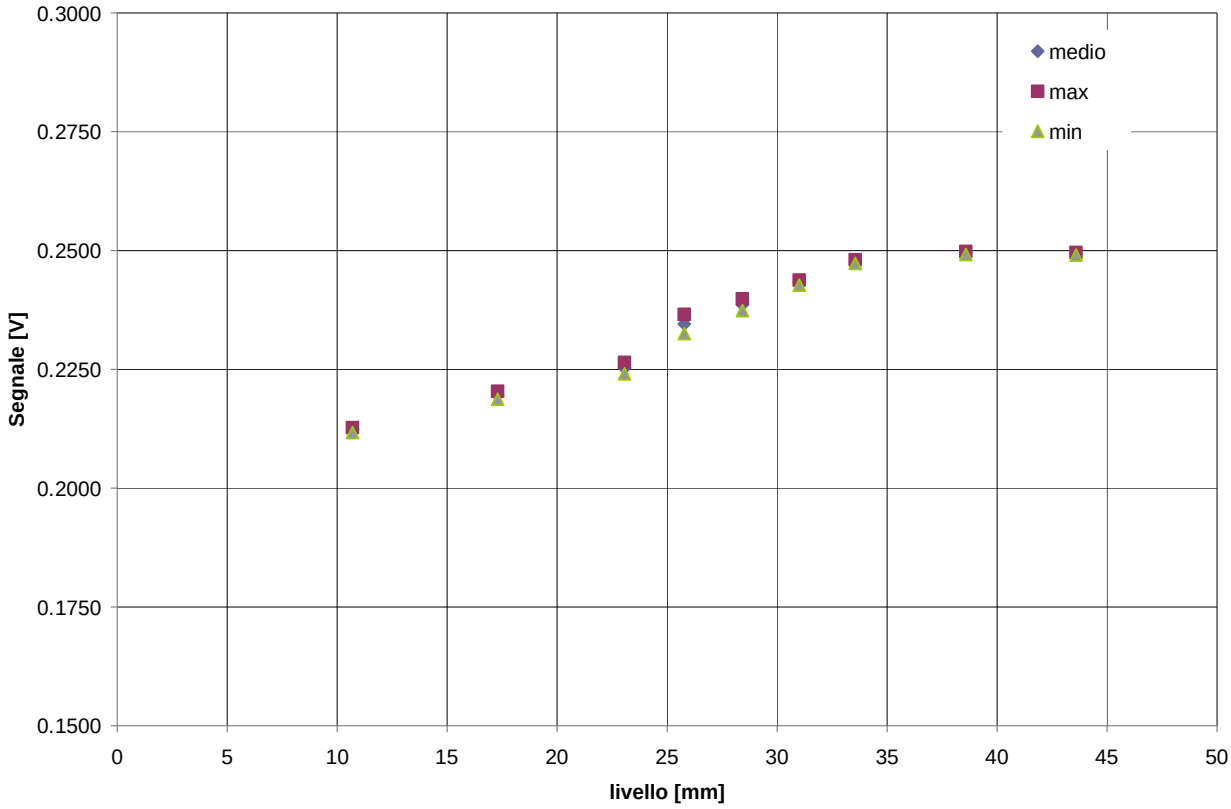


Fig. 79 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 5

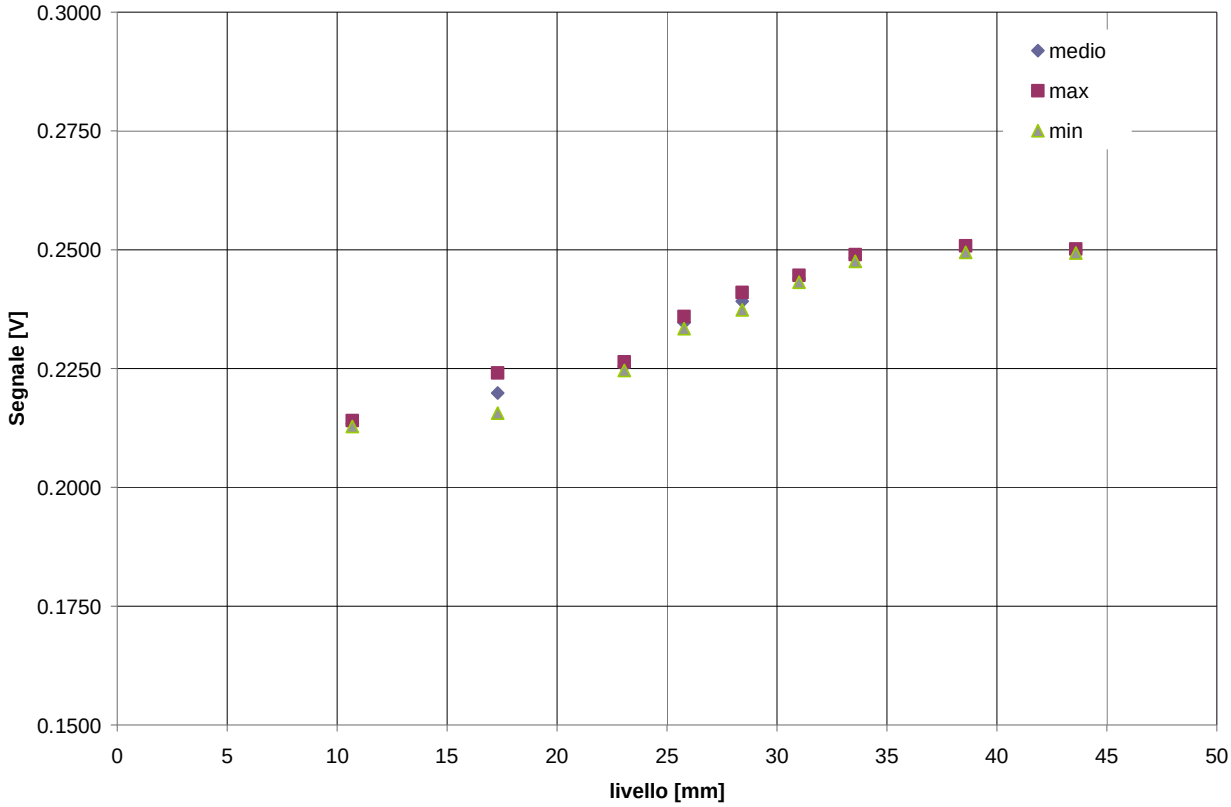


Fig. 80 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 6

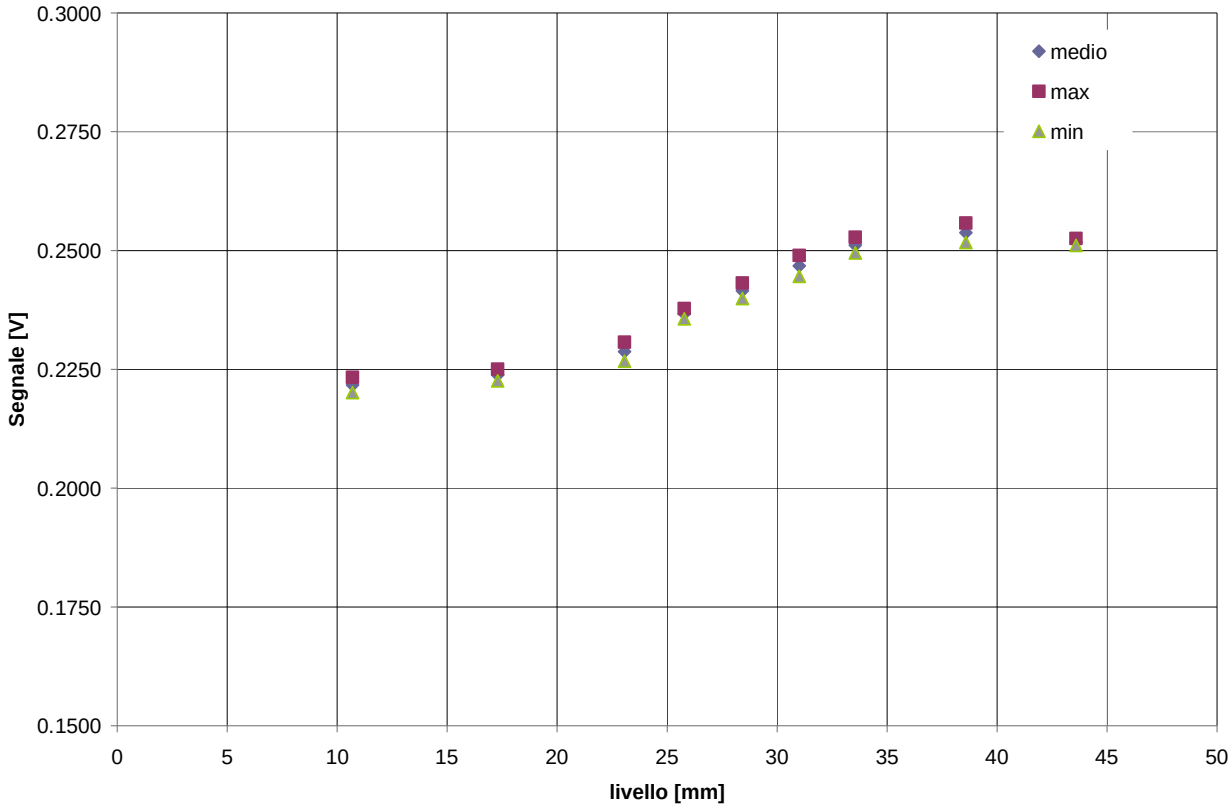


Fig. 81 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 7

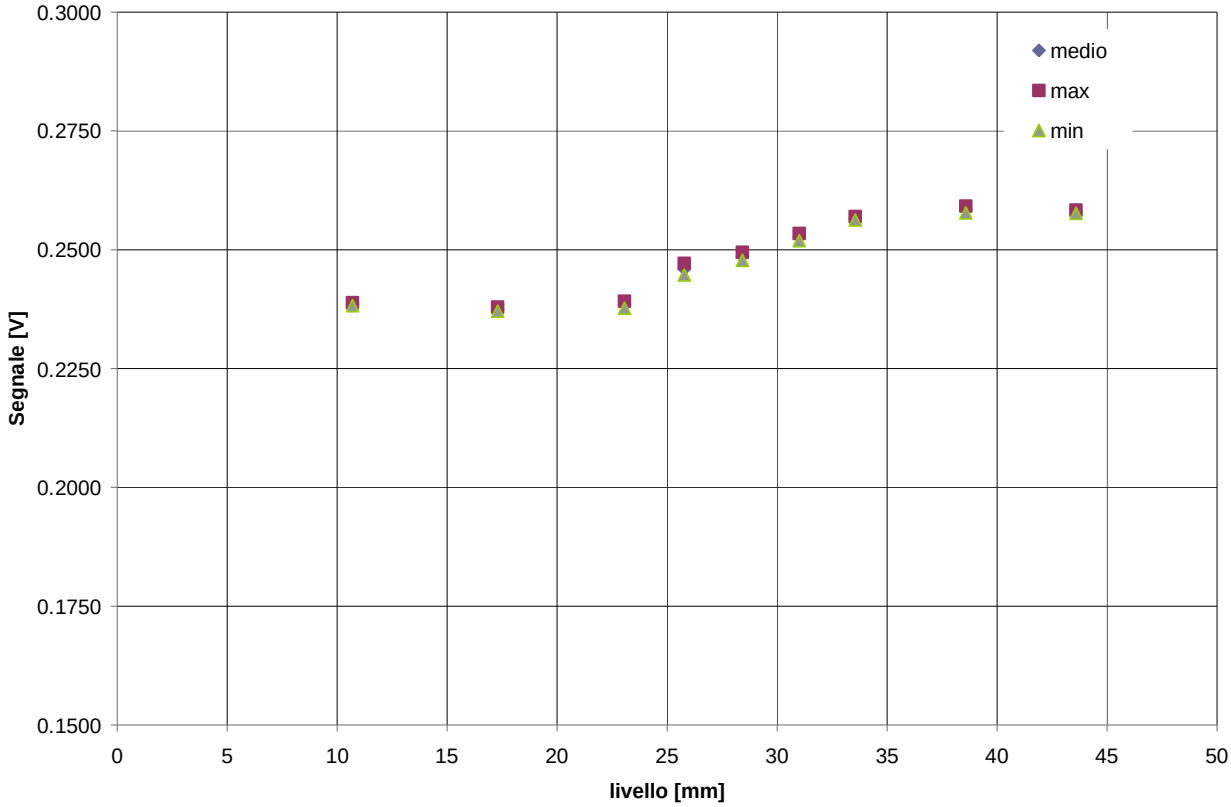


Fig. 82 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 8

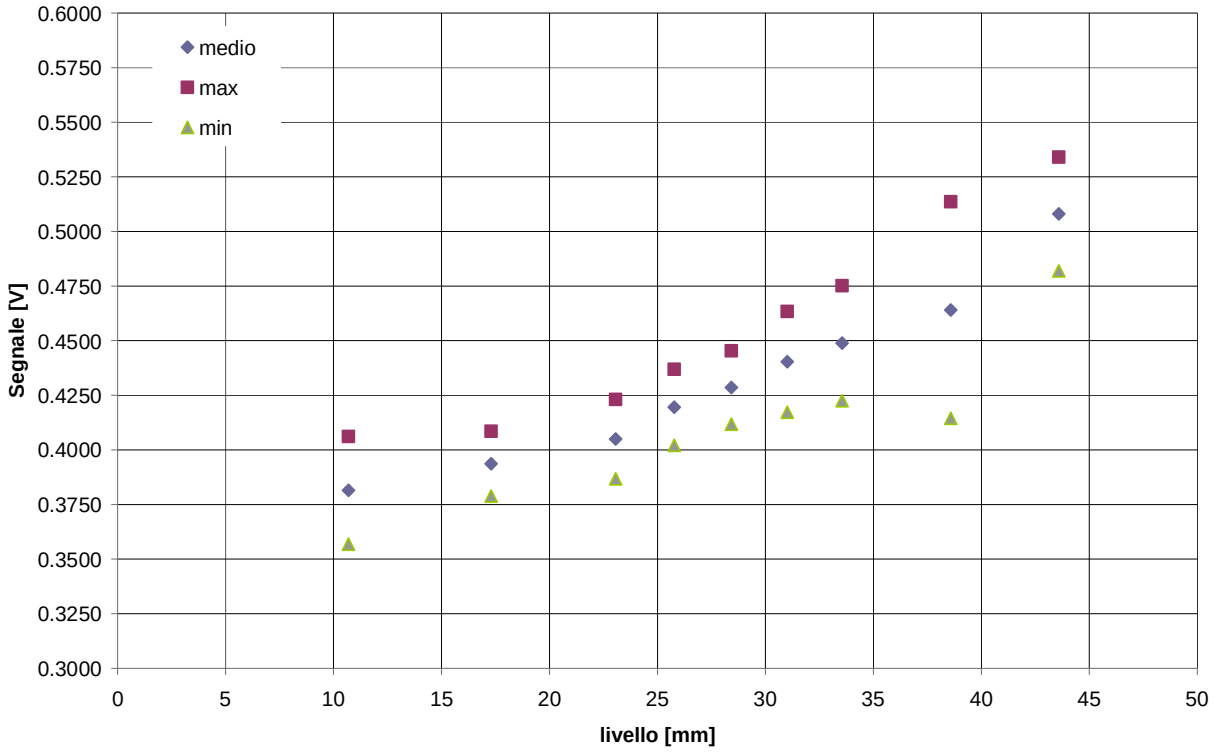


Fig. 83 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 1 C

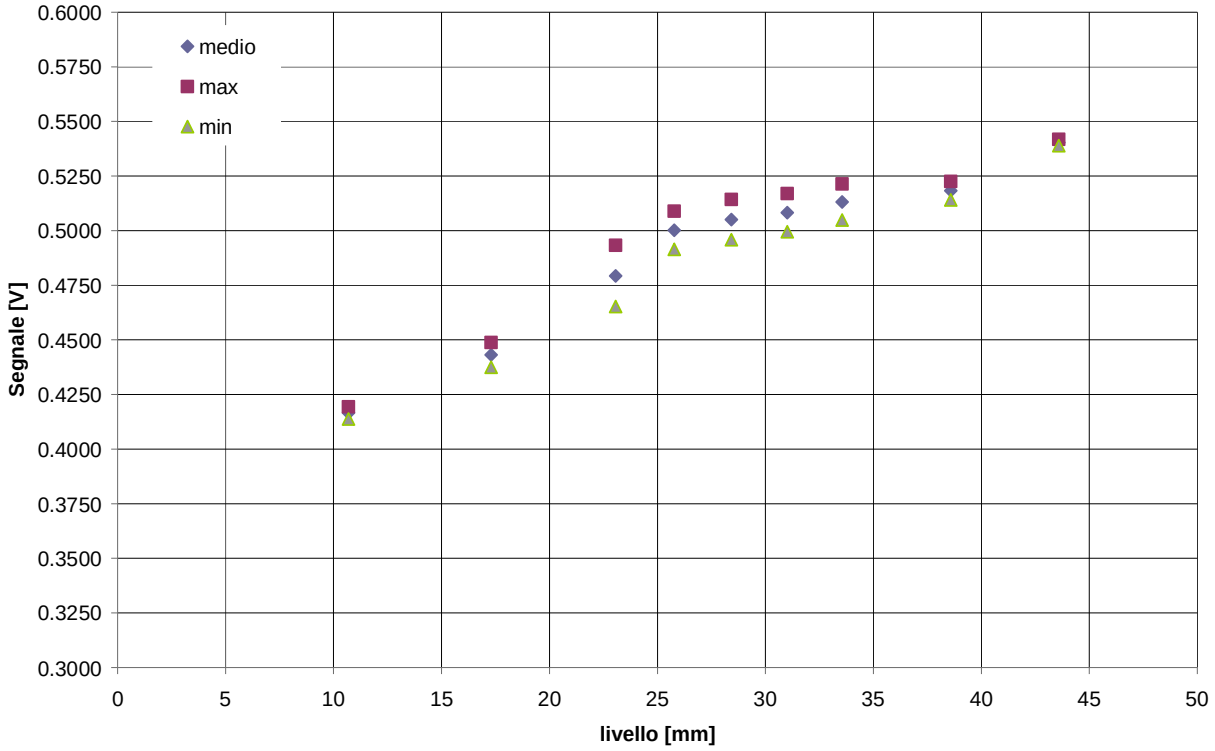


Fig. 84 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 2 C

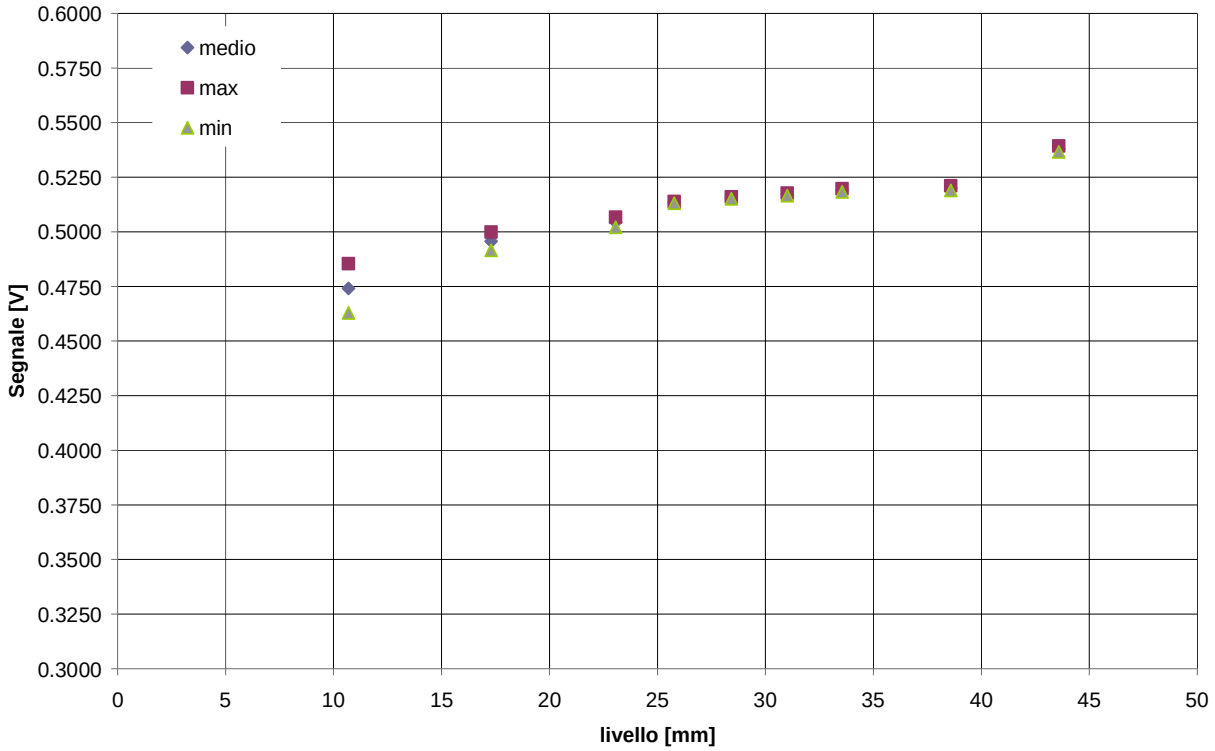


Fig. 85 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 3 C

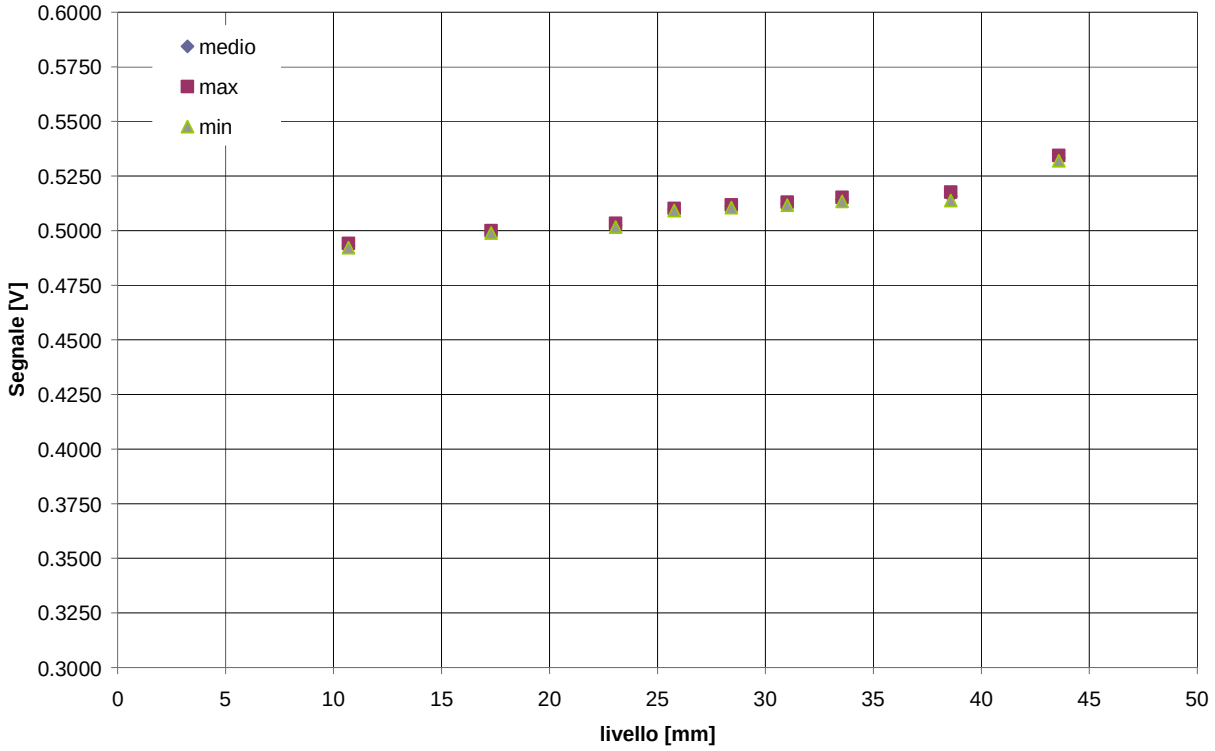


Fig. 86 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 4 C

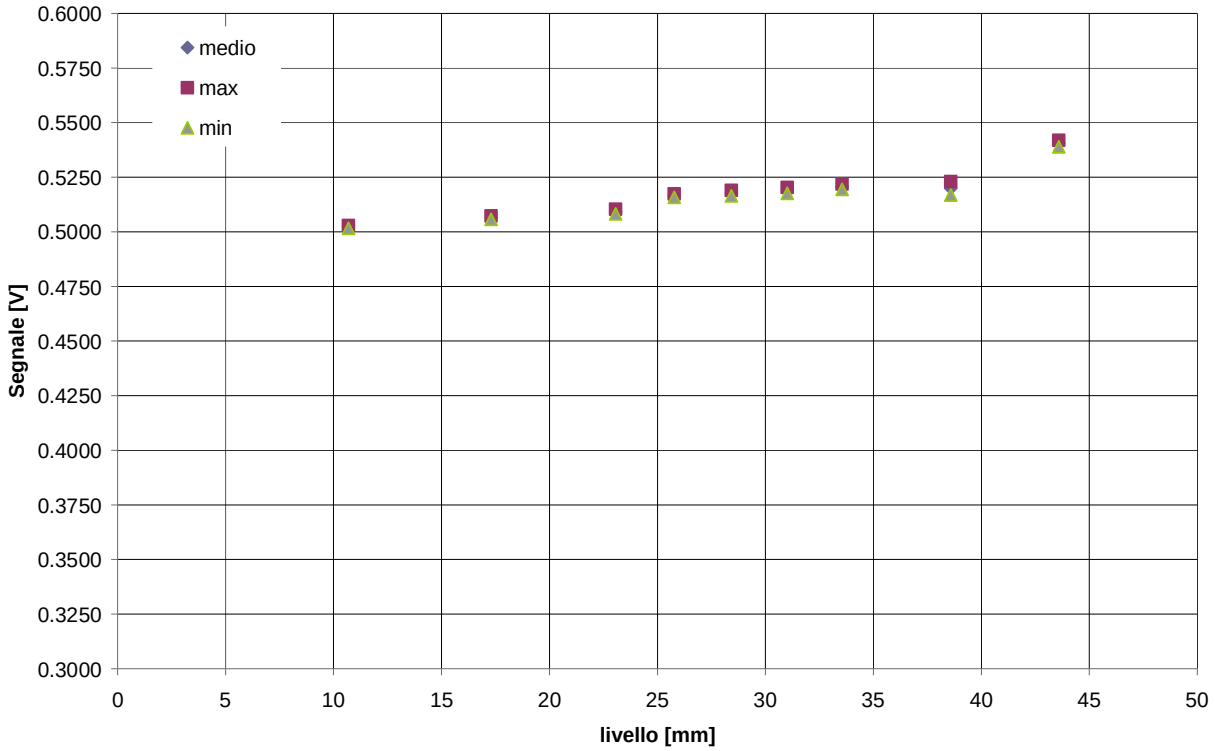


Fig. 87 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 5 C

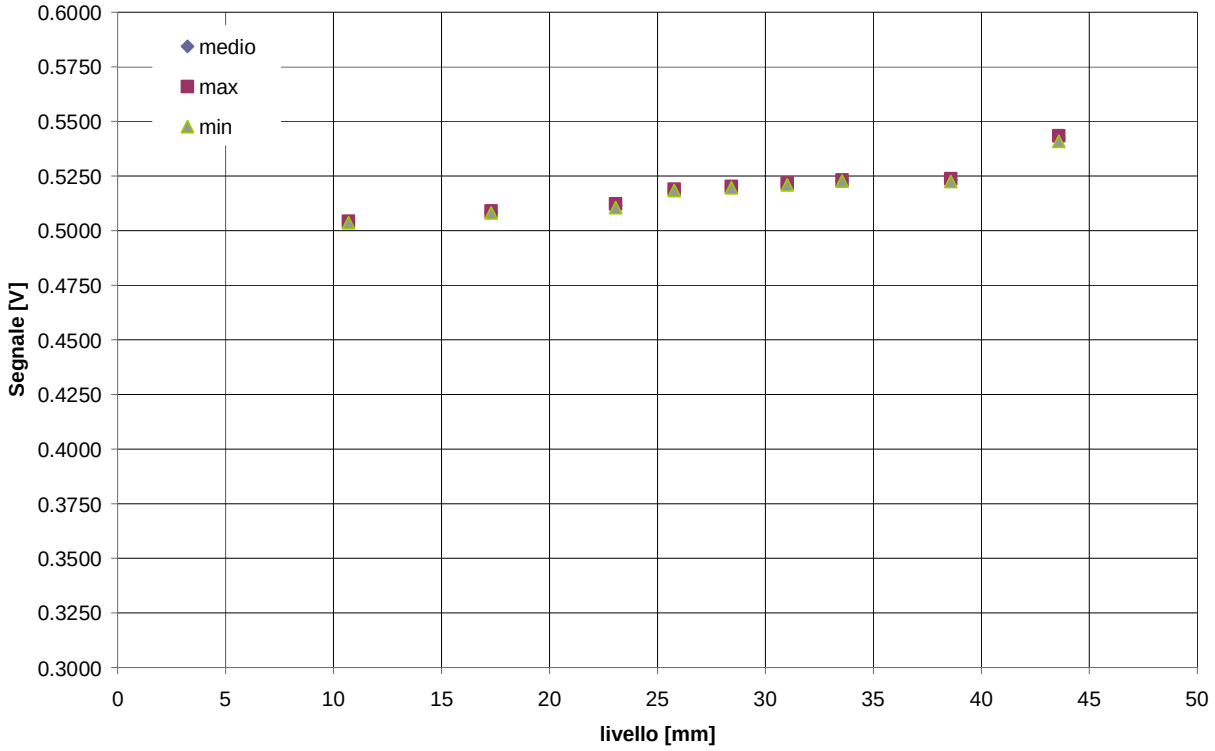


Fig. 88 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 6 C

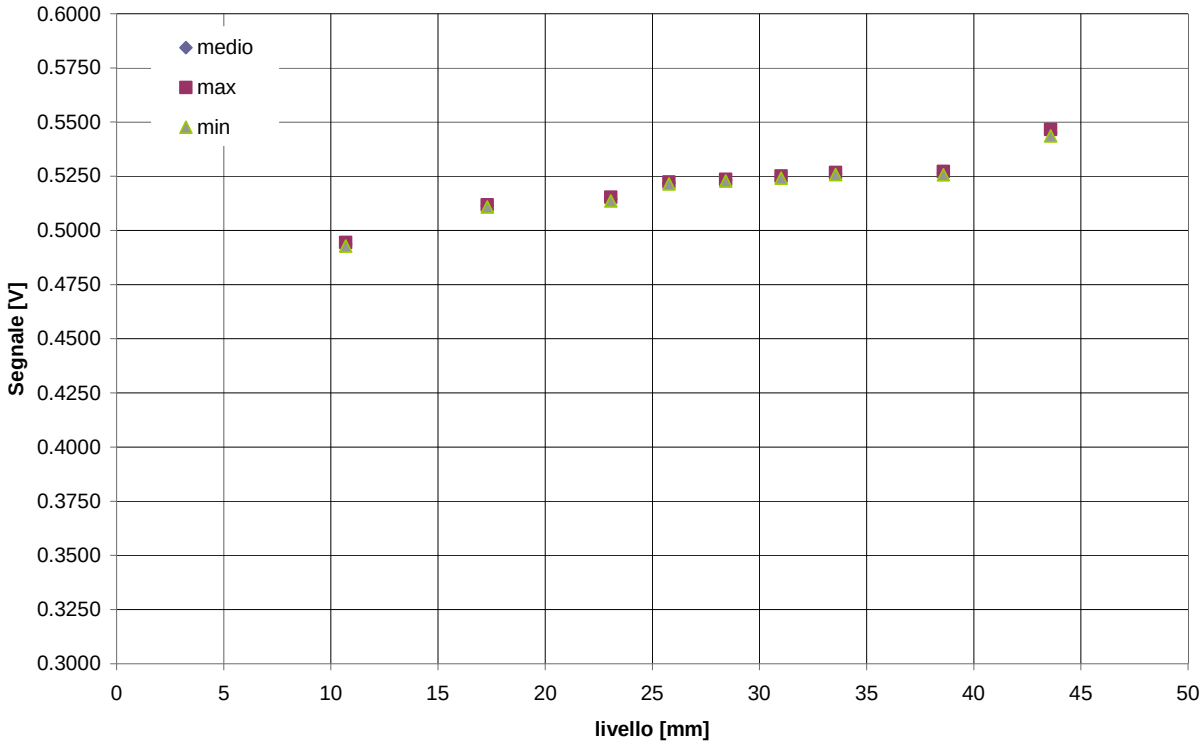


Fig. 89 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 7 C

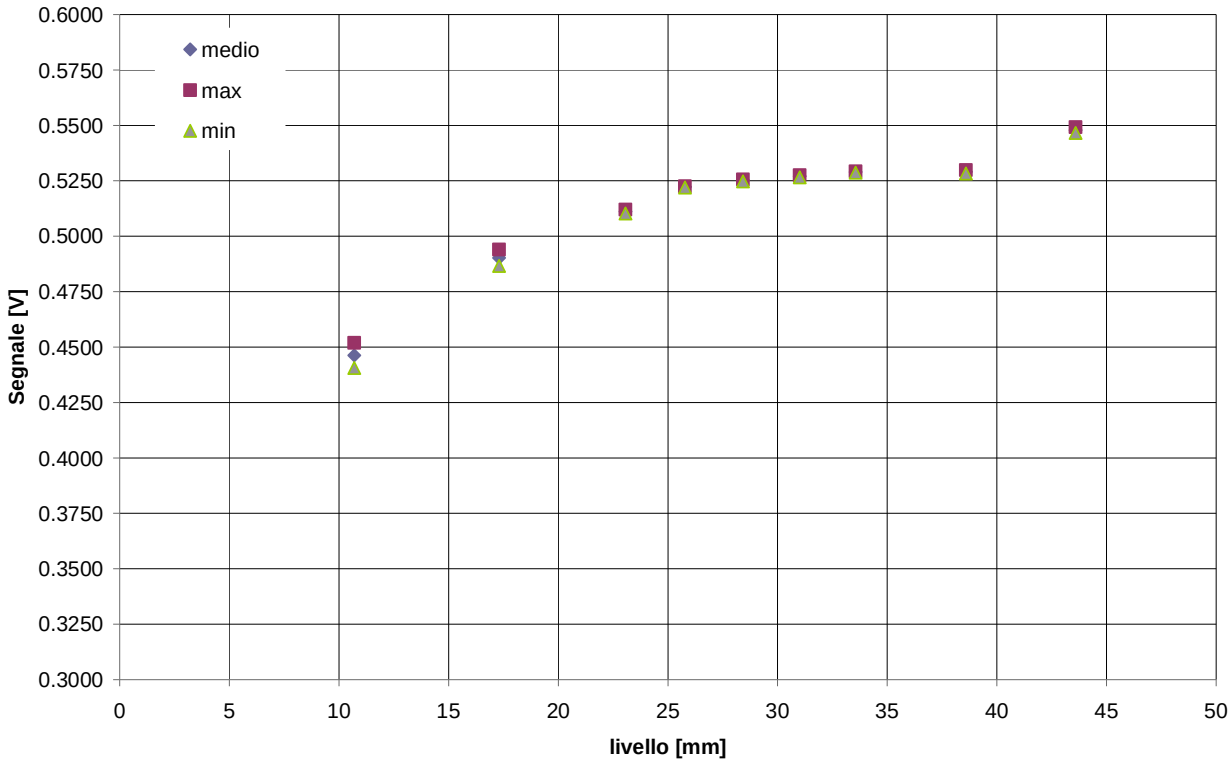


Fig. 90 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 8 C

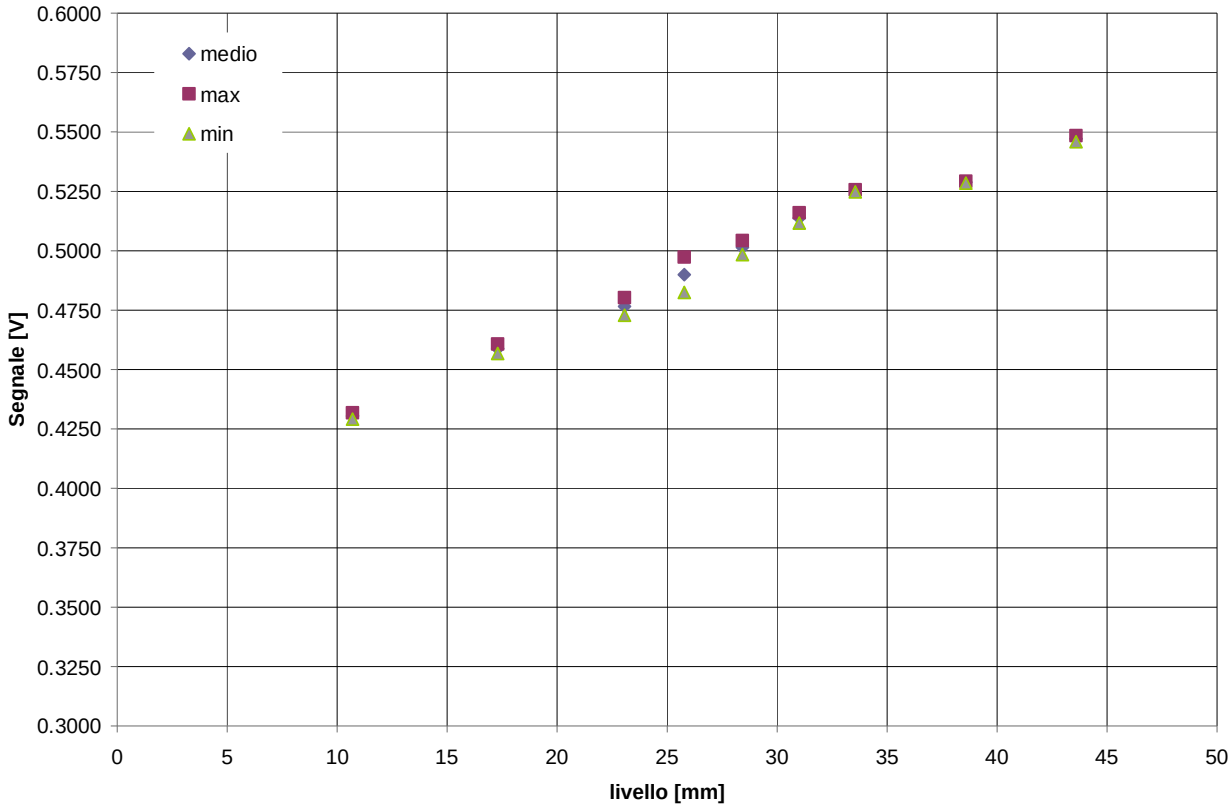


Fig. 91 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – combinazione elettrodi 9 C

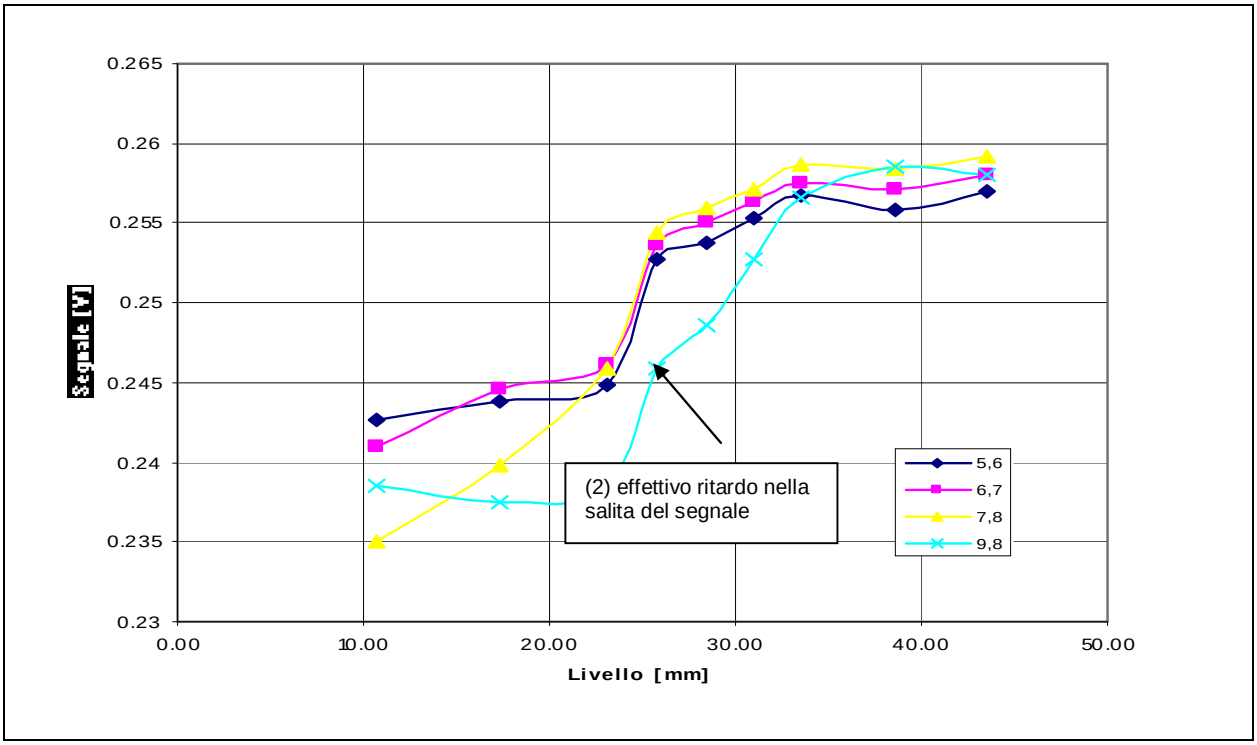


Fig. 92 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a destra e spaziati di 22.5 °

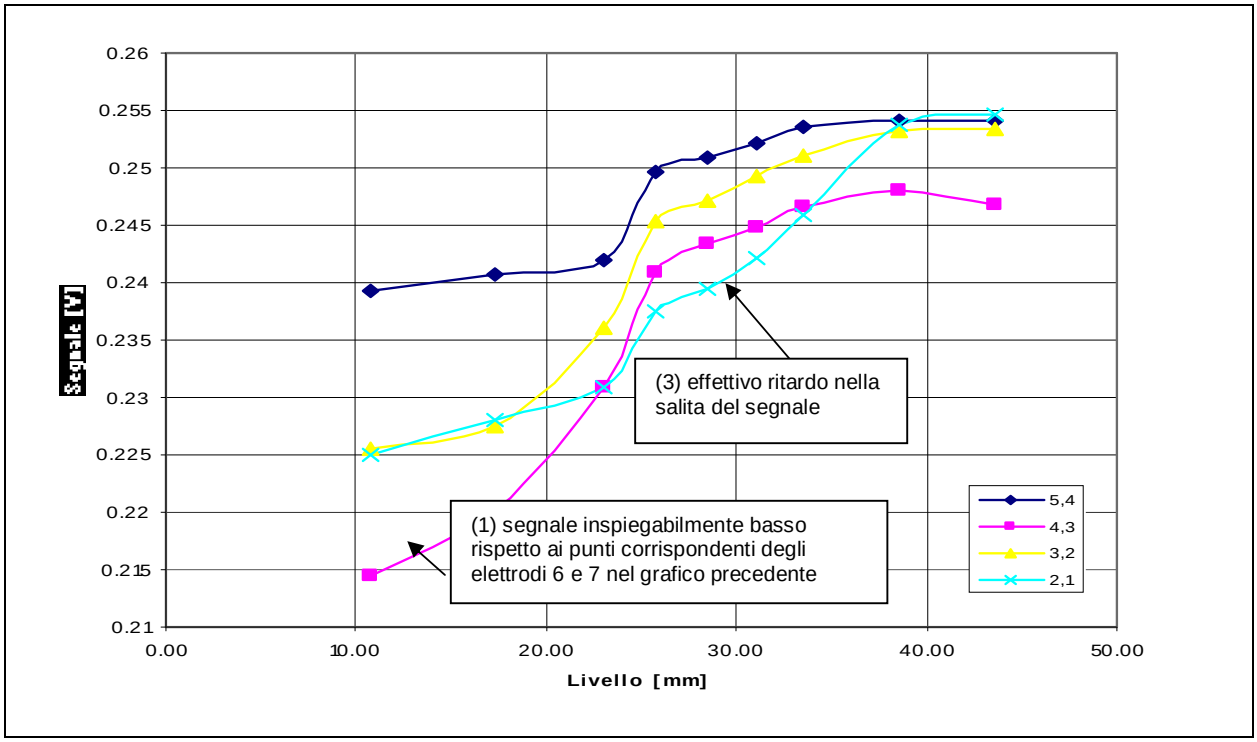


Fig. 93 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a sinistra e spaziati di 22.5 °

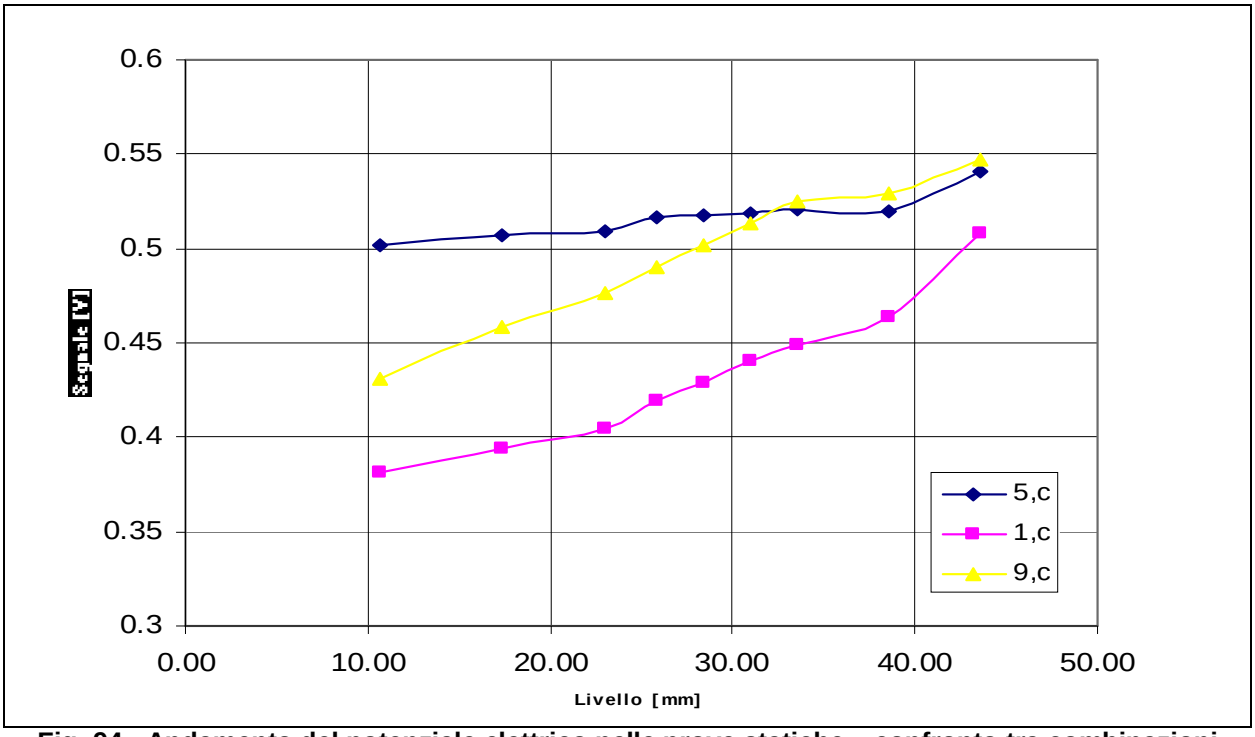


Fig. 94 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni dell'elettrodo centrale con tre elettrodi periferici posti a 90° l'uno dall'altro

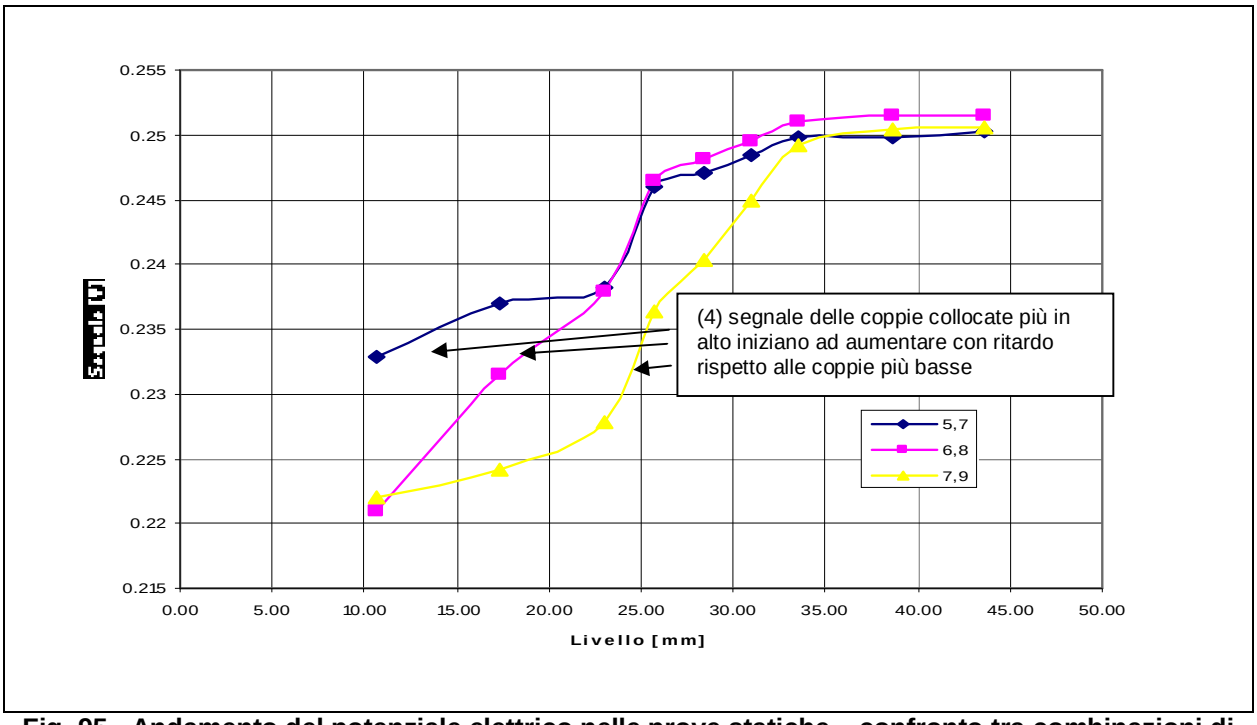


Fig. 95 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a destra e spaziati di 45°

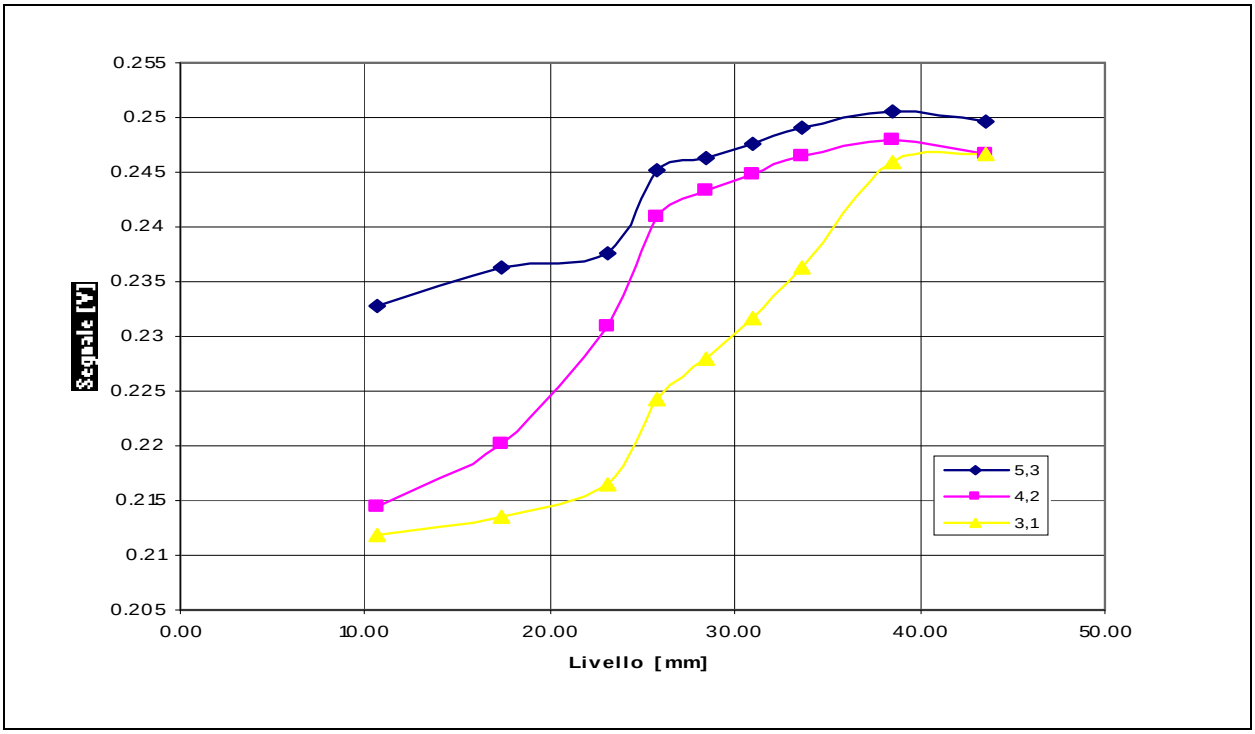


Fig. 96 - Andamento del potenziale elettrico nelle prove statiche – confronto tra combinazioni di elettrodi posti a sinistra e spaziati di 45°

6 PROTOTIPO OPERANTE A CALDO

6.1 Scopo

Il prototipo operante a caldo ed in pressione è stato realizzato per mettere a punto la tecnologa, sperimentando con flussi bifase liquido-vapore.

6.2 Condizioni operative e dimensionamento

Le condizioni di progetto del prototipo operante a caldo sono le seguenti:

Pressione massima 15 bar (relativi)
Temperatura massima 201 °C

I limiti sulle condizioni operative sono dettati dalla tubazione in pyrex che costituisce il tubo in materiale isolante esternamente al quale sono fissati gli elettrodi.

In Tab. 4 sono riassunti i risultati della verifica strutturale a pressione interna del tubo in pyrex, partendo dai dati di resistenza a rottura riportati in Tab. 5. Il coefficiente di sicurezza è stato ridotto di 3 volte, assumendo come riferimento non la pressione di prova idraulica, ma la pressione di esercizio. La riduzione del coefficiente di sicurezza è accettabile, perché gli aspetti legati alla sicurezza sono garantiti dall'involucro metallico esterno, per cui una eventuale rottura del tubo in pyrex danneggerebbe unicamente lo strumento.

Il contenitore in acciaio, che ospita il tubo in pyrex, normalmente non è mantenuto in pressione, tuttavia è progettato per le stesse condizioni del tubo in pyrex (15 bar relativi e 201 °C) che si possono verificare al suo interno in caso di rottura del tubo in pyrex stesso. La Tab. 6 riporta la verifica strutturale a pressione del contenitore le cui dimensioni sono: spessore uguale a 3.2 mm ed diametro interno uguale a 267 mm.

Le flange di accoppiamento tra il tratto cilindrico e i fondelli sono UNI DN 250 PN 6 e sono state modificate per raddoppiare il numero dei fori dei bulloni, da 12 a 24 viti 16MA.

In Tab. 7 è riportata la sintesi della verifica dei bulloni, a 19 bar di pressione (previsti per la prova idraulica), dopo il raddoppio.

Tab. 4 - Verifica del tubo in pyrex

Resistenza a trazione (a rottura)	49	MPa
Resistenza a trazione (a rottura)	49	N/mm^2
coefficiente di riduzione	3	
Trazione ammissibile	16.3	N/mm^2
Pressione massima d'esercizio	15	bar
Pressione di prova idraulica	15	bar
Diametro (esterno)	90	mm
Spessore	5.1	mm
Sollecitazione unitaria	13.2	N/mm^2
Confronto tra trazione ammissibile e sollecitazione unitaria	Positivo	

Tab. 5 - Caratteristiche del pyrex

CARATTERISTICHE TECNICHE

- **T max:** *490° C (punta massima momentanea)*
- **T lavoro:** *230° C*
- **Δ T max:** *130° C*

PROPRIETÀ FISICHE

- **Peso specifico, g/cm³:** *2,23*
- **Indice di rifrazione n_d:** *1,474*
- **Coefficiente di dilatazione termica:** *32,5 x 10^{-7} x K^{-1}*
- **Modulo di Young, Kg/mm²:** *6400*
- **Coefficiente di Poisson:** *0,20*
- **Durezza Knoop, KHN 100:** *418*
- **Carico di rottura alla flessione alternata (25° C), N/mm²:** *49 (pari a Kg/mm²: 4,9)*

Tab. 6 - Verifica del tubo in acciaio esterno

Resistenza a trazione (a rottura)	150	MPa
Resistenza a trazione (a rottura)	150	N/mm^2
coefficiente di riduzione	1	
Trazione ammissibile	150	N/mm^2
Pressione massima d'esercizio	15	bar
Pressione di prova idraulica	19	bar
Diametro (esterno)	273	mm
Spessore	5.1	mm
Sollecitazione unitaria	50.8	N/mm^2
Confronto tra trazione ammissibile e sollecitazione unitaria	Positivo	

Tab. 7 - Verifica degli accoppiamenti flangiati

viti 5.8 16MA		
carico di rottura	81500	N
carico ammissibile (1/4)	20375	N
Diametro tubazione	0.276	m
Diametro esterno guarnizione	0.317	m
Area centrale	0.059798	m^2
Area guarnizione	0.019086	m^2
Pressione fluido	1.90E+06	Pa
Pressione guarnizione	3.80E+06	Pa
Forza fluido	1.14E+05	N
Forza guarnizione	7.25E+04	N
Forza totale	186142	N
Numero viti	24	
Carico su una vite	7756	N
Verifica (confronto con carico ammissibile)	Positiva	

6.3 Struttura del prototipo a caldo

Il disegno 077.01.00 rev.1 dell'Allegato 4 mostra la struttura del prototipo a caldo. In particolare sono visibili:

- il tubo principale in pyrex, che supporta gli elettrodi;
- il tubo ausiliario in pyrex, che consente l'isolamento del tratto centrale;
- l'elettrodo centrale con l'anello metallico, che consente il supporto dello strumento e la connessione elettrica;
- Il contenitore di sicurezza con il sistema di raffreddamento;
- le barre filettate che supportano le schede elettroniche;
- i dettagli delle cave, che ospitano le sedi degli o-ring e delle guarnizioni, realizzate negli alloggiamenti dei tubi in pyrex.

La tenuta tra i tubi in pirex e le connessioni metalliche è assicurata da un doppio O-RING in elastomero, resistente a temperature superiori a 200 °C.

Un aspetto critico per l'elettonica del sistema è rappresentato dalla temperatura, che si realizza nella zona intermedia tra il tubo in pyrex e il tubo metallico esterno. Tale temperatura non deve superare 70°C, limite massimo per l'operatività dei reed relè, come riportato nella scheda tecnica in Fig. 97.

SIL - Serie

Single-In-Line Reed-Relais reduzieren den Platzbedarf auf ein Minimum

MEDER electronic

Die SIL-Reed-Relais werden als Spannungsrelais oder zur Schleifenstromerkennung eingesetzt. Trotz halbem Platzbedarf gegenüber der DIP/DIL-Serie, muß dabei nicht auf die Vorteile der Reed-Relais-Lösung verzichtet werden.

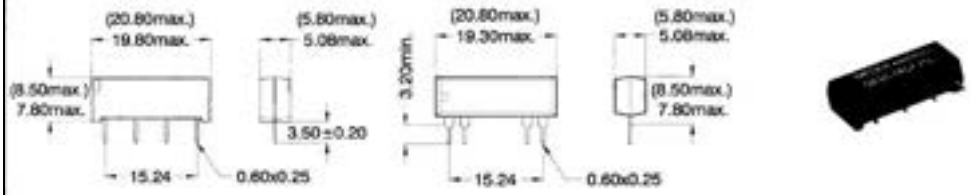
Auch diese Serie entspricht mit ihrer Zulassung nach EN60950 den hohen Anforderungen bezüglich der Luft- und Kriechstrecken.

Merkmale:

- Zulassung nach EN60950
- Hohe Spulenwiderstände bis 2.000 Ohm bei 12 V
- Schleifenstromerkennung mit U_{in} = 15 mA
- Magnetischer Schirm lieferbar
- Trennspannung Spule / Kontakt bis 4,25 kVDC

Abmessungen

Toleranz ± 0.10 mm Angaben in ( ) gelten für die Ausführungen mit Metallhaube



Relaisdaten

Arbeitstemperatur		(°C)	-20 / +70
Lagertemperatur		(°C)	-35 / +95
Isol. Spule-Kontakt	min.	(kV)	1,5 DC (4,25 DC / 3,0 AC bei Schema 73L)
Isol. Spule-Kontakt	min.	(Ω)	10^{11}
Lebensdauer			Lastabhängig, fragen Sie an
Lötzeit / Temperatur	max.		10 Sek. / 260 °C
Waschfähigkeit			Fluxdicht

Kontaktdaten

Andere Kontakte auf Anfrage

Kontaktbezeichnung				71	72	75	84	81
Kontaktart				A / B dry	A / B dry	A / B dry	A / B dry	A / dry
Schaltleistung		max.	(W)	10	15	10	10	5
Schaltspannung		max.	(VDC)	200	200	500	400	90
Schaltstrom		max.	(A)	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
Strom bei geschlossenem Kontakt			(A)	1,0	1,25	1,0	1,0	1,0
Kontaktwiderstand		max.	(mΩ)	150	150	200	150	200
Isolationswiderstand			(Ω)	10^{13}	10^{13}	10^{13}	10^{11}	10^{15}
Durchbruchspannung		min.	(VDC)	250	250	1'500*	700	100
Schaltzeit inkl. Prellen			(ms)	0,5	0,5	0,5	2,0	0,5
Abfallzeit			(ms)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Schock	bei 11 ms	max.	(g)	150	150	30	50	150
Vibration	bei 10 - 2000 Hz	max.	(g)	10	10	30	35	10
			(Hz)	10 - 2000	10 - 2000	50 - 1500	10 - 2000	50 - 2000

Daten bei 140% der Ansprecherregung und 20°C

* (S. 2 zur Durchbruchspannung)

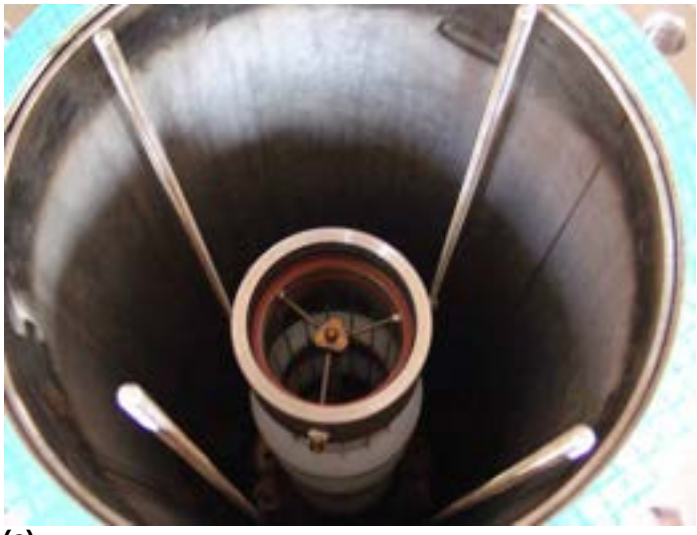
MEDER electronic AG - Robert-Bosch-Str. 4 - D-78224 Singen/Htwl. - ☎ 49(0)7731/83990 - Fax 49(0)7731/8399 32

Fig. 97 - Scheda dati reed relè

Le immagini nelle Fig. 98, Fig. 99 e Fig. 100 mostrano le diverse parti del prototipo operante a caldo.

(a)

(b)



(c)

Fig. 98 - (a) Tubo in pirex montato sulla flangia inferiore, (b) Tubo in acciaio, (c) Vista dall'alto del tubo in acciaio privo della flangia superiore

Fig. 99 - Strumento in fase di prova idraulica

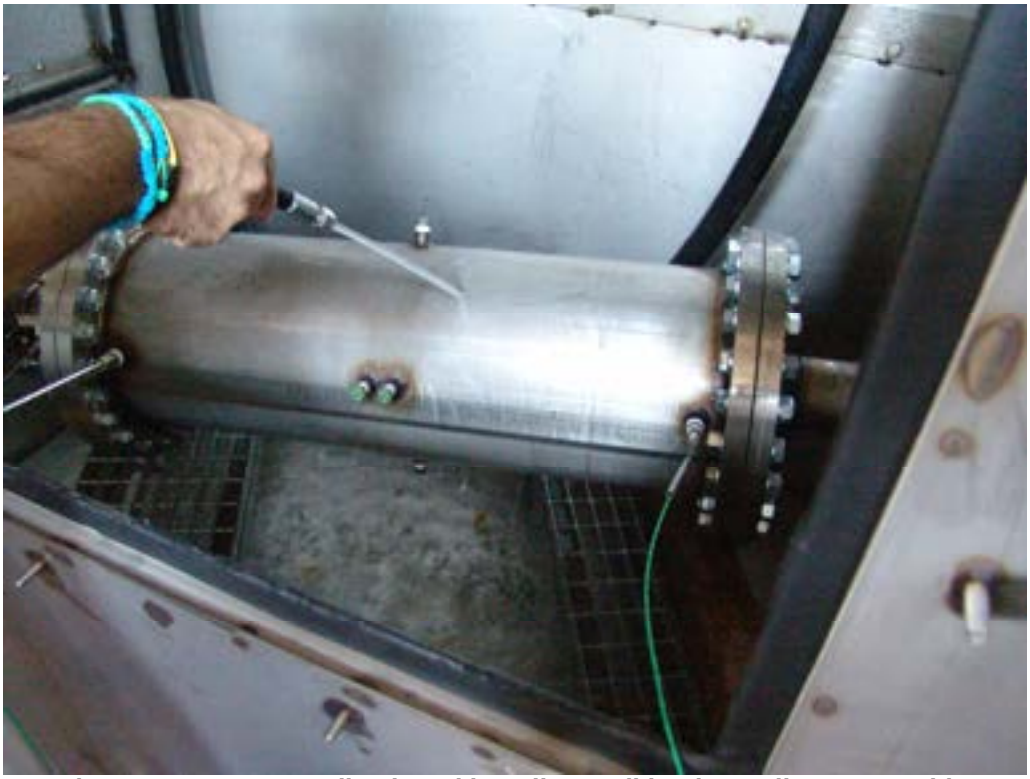


Fig. 100 - Strumento allestito ed installato sull'impianto di prova a caldo

6.4 Prove eseguite

Il prototipo a caldo è stato provato, presso i laboratori della SIET, con lo scopo principale di dimostrare l'idoneità del dispositivo a lavorare alle condizioni di pressione e temperatura di progetto.
Prove ulteriori sono previste per verificare la tecnologia sviluppata nelle condizioni di flussi bifase acqua-vapore.

6.4.1 Prova idraulica del solo contenitore metallico.

La funzione del contenitore metallico è quella di contenere il vapore nel caso in cui si determini una rottura del tubo in pirex o una perdita di vapore significativa da una delle tenute tra pirex ed acciaio.
La prova idraulica del contenitore metallico è stata effettuata, senza schede elettroniche e senza tubo in pirex, pressurizzandolo con acqua alla condizione di prova idraulica di 19 bar (15 * 1.25 = 19 bar).
Nessuna perdita è stata rilevata.

6.4.2 Prova idraulica dello strumento allestito

Lo strumento, allestito con la struttura descritta nei paragrafi 6.2 e 6.3, è stato quindi sottoposto ad ulteriore prova idraulica con pressurizzazione a 19 bar per 5 minuti. Nessuna perdita è stata rilevata.

6.4.3 Prova con vapore

Il dispositivo, completamente assemblato, è stato sottoposto a una sequenza di riscaldamenti realizzati con vapore saturo.

Il collegamento tra la sorgente di vapore (prodotto in un tubo riscaldato elettricamente) ed il dispositivo in prova è stato realizzato con tubo in acciaio INOX di diametro interno 6 mm, dotato di una valvola manuale. Allo stesso modo, l'uscita del vapore è stata dotata di un'altra valvola manuale.

Il dispositivo è stato strumentato con un trasmettitore di pressione relativa, collegato all'ingresso del vapore, ed una termocoppia inserita sul tubo centrale DN80 del dispositivo, in corrispondenza dell'uscita del vapore.

Un'altra termocoppia è stata inserita nell'intercapedine tra tubo in pyrex e tubo di acciaio per misurare la temperatura effettiva dello spazio destinato ad ospitare le schede elettroniche.

All'intercapedine è stata collegata una linea in grado di pressurizzare l'intercapedine stessa con aria a 6 bar, al fine di poter ridurre la sollecitazione del tubo in pyrex dovuta alla pressione interna.

Per raffreddare l'intercapedine, non sono stati utilizzati i solenoidi previsti in tubo di rame, ma è stata spruzzata acqua sull'esterno del tratto cilindrico dell'involucro stesso. Tali solenoidi verranno installati in una fase successiva di messa a punto del sistema.

Sono stati realizzati otto transitori di riscaldamento. Il primo ed il secondo sono stati realizzati con una velocità di salita di pressione e temperatura abbastanza limitata, per ridurre le sollecitazioni del sistema. Inoltre, il primo transitorio è stato arrestato alla pressione di circa 3.4 bar.

Durante i primi due transitori, è stata mantenuta, nell'intercapedine, una pressione di 6 bar con aria compressa.

Dal terzo transitorio in poi è stata eliminata la pressione nell'intercapedine in modo da massimizzare la sollecitazione nel tubo in pyrex ed è stata aumentata anche la velocità di riscaldamento fino a circa 100 °C in 50 secondi, nel terzo transitorio.

All'inizio del quarto transitorio si è verificata la rottura del trasmettitore di pressione relativa, collegato al tubo centrale. Le prove sono comunque proseguite visto che, essendo il vapore saturo, è sufficiente la conoscenza della temperatura per ricavare la pressione. In particolare si vede che i transitori successivi al quarto sono caratterizzati da una temperatura massima simile ai transitori precedenti.

Nel corso delle prove è stata rilevata la temperatura nell'intercapedine che contiene le schede, che ha raggiunto il valore massimo di 95 °C.

Questo valore è maggiore di 25 °C rispetto al limite di 70°C richiesto dai reed relè.
Merita però sottolineare che la superficie raffreddata è stata meno della metà della superficie prevista per il raffreddamento dell'aria tramite i due solenoidi in rame, come riportato in Tab. 8.
Inoltre, essendo stato dimostrato anche sperimentalmente (dal terzo transitorio in poi) che il tubo in pyrex resiste alla piena pressione, sarà possibile, in fase di esercizio a caldo, evitare la pressurizzazione dell'intercapedine, mantenendola invece flussata con aria compressa, per aumentare l'azione di raffreddamento.

Con l'attivazione del raffreddamento tramite i solenoidi in rame, la temperatura prevista nell'intercapedine è di 55 – 60 °C, valore compatibile con il limite di funzionamento dei reed relè (70 °C).

I risultati delle prove sul prototipo a caldo sono riassunti raccolti nel capitolo 7.

Tab. 8 - Calcolo delle superfici scambianti per il raffreddamento

0.267	m	diametro interno dell'involucro
0.83	m	lunghezza della parte cilindrica
0.695855	m^2	superficie della parte cilindrica
0.345	m	Lunghezza assiale di un solenoide in tubo di rame
0.259	m	diametro medio del solenoide
0.813	m	sviluppo di una spira del solenoide
38.33		giri per ogni solenoide
31.175	m	Sviluppo del tubo da 8 mm di un solenoide
0.783115	m^2	superficie laterale scambiante di ogni solenoide
1.56623	m^2	superficie laterale scambiante di due solenoidi
0.444287		Rapporto tra superficie cilindrica e superficie laterale di due solenoidi

7 RISULTATI DELLE PROVE SUL PROTOTIPO CALDO

7.1 Sonda senza l'elettronica

I risultati delle prove a freddo hanno dimostrato la funzionalità dell'elettronica che sta alla base dello sviluppo della sonda. Le schede del prototipo a caldo, al di là del raddoppio del numero di elettrodi, sono uguali a quelle del prototipo a freddo, pertanto non è stato necessario provarle di nuovo.

Le prove sul prototipo a caldo sono state eseguite senza avere installato le schede elettroniche, con lo scopo primario di verificare la parte strutturale della sonda, senza danneggiare l'elettronica, in caso di perdite nell'intercapedine tra il tubo in pyrex ed il contenitore metallico.

La caratterizzazione del prototipo a caldo, dal punto di vista della misura del grado di vuoto del sistema con miscela bifase acqua-vapore, è prevista per una fase successiva di sperimentazione per la quale dovrà essere allestito un circuito opportuno, con valvole rapide, simile a quello per acqua-aria del Politecnico di Torino [6].

Le figure da Fig. 101 a Fig. 105 mostrano gli andamenti delle grandezze registrate nelle prove a caldo, i cui risultati sono sintetizzati nel Cap. 6.

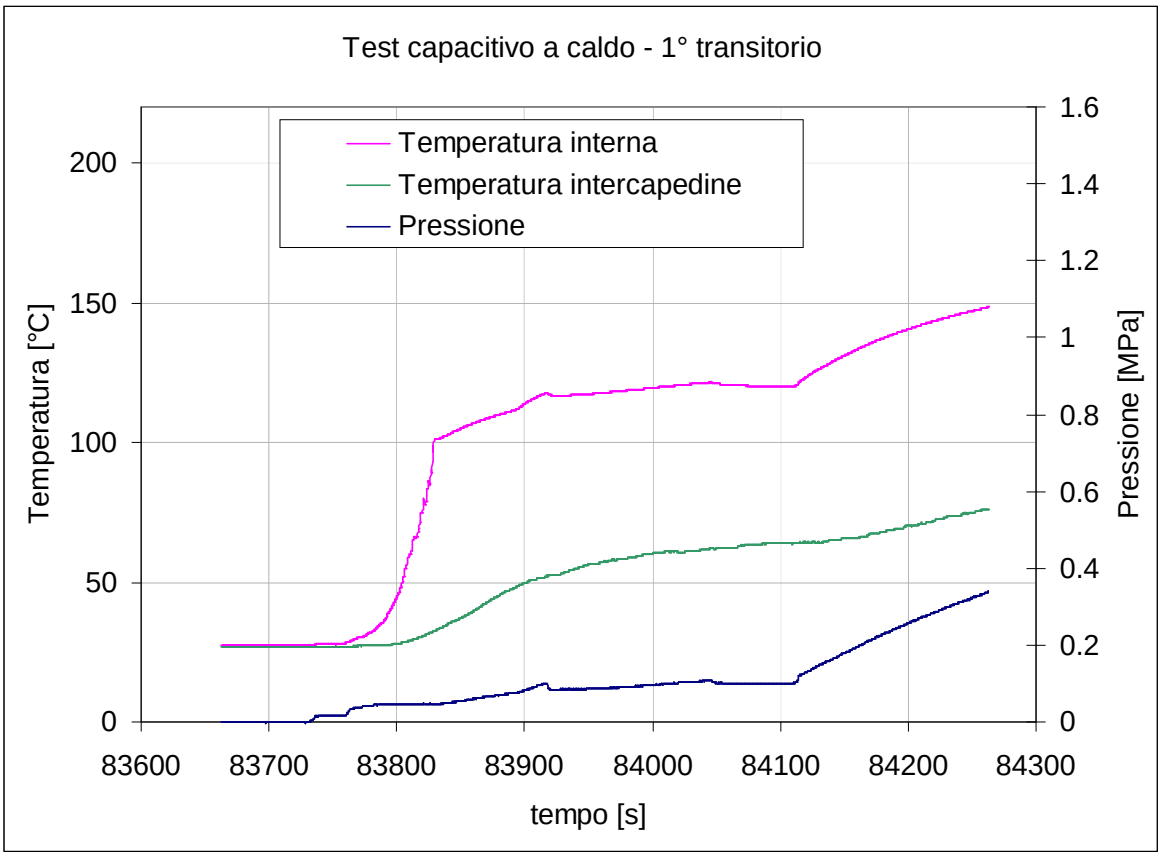


Fig. 101 – Test a caldo: Primo transitorio di temperatura e pressione

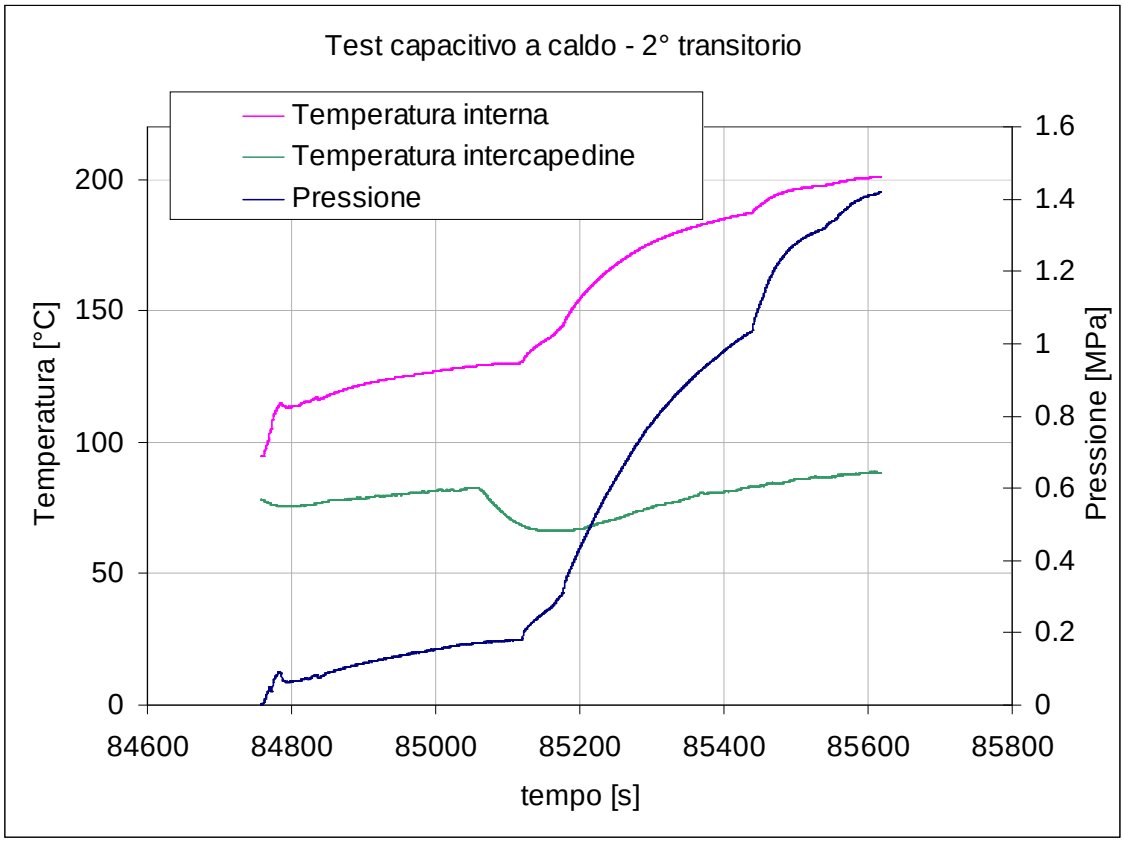


Fig. 102 – Test a caldo: Secondo transitorio di temperatura e pressione

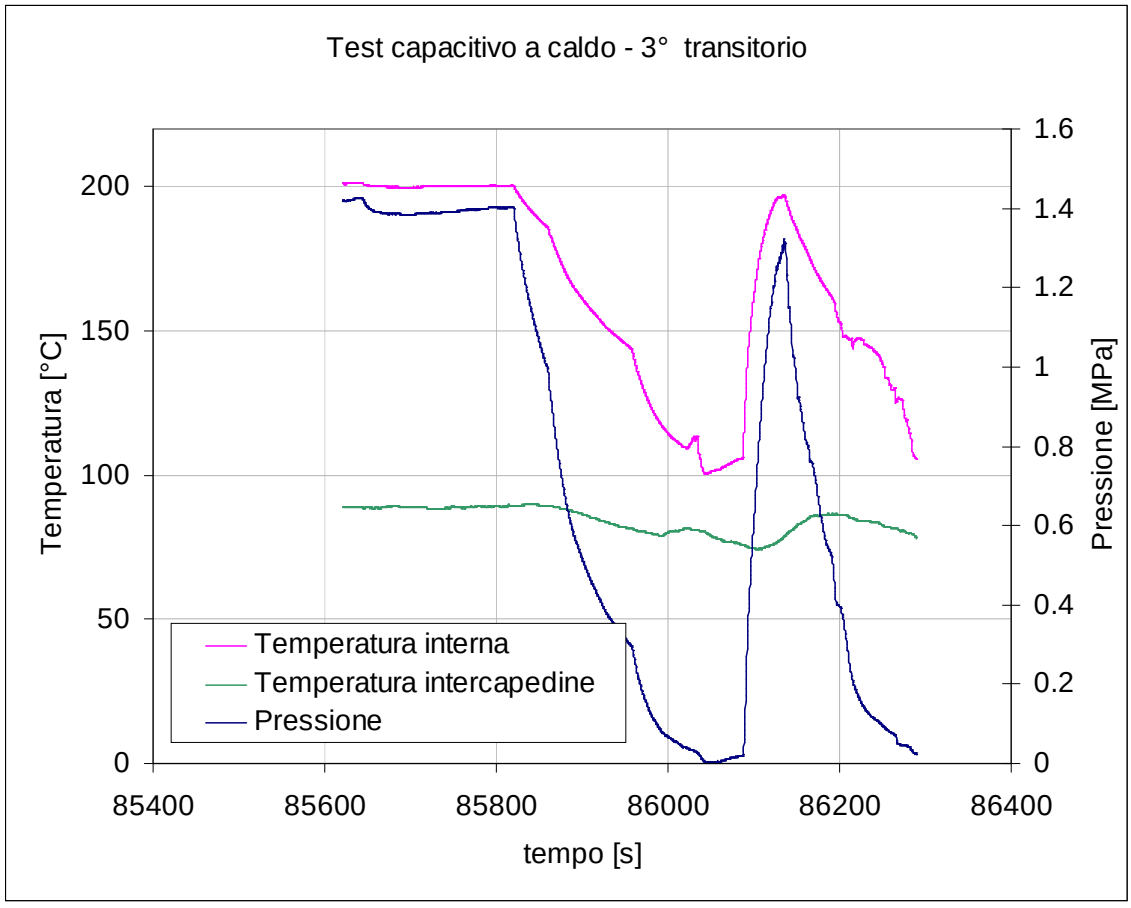


Fig. 103 – Test a caldo: Terzo transitorio di temperatura e pressione

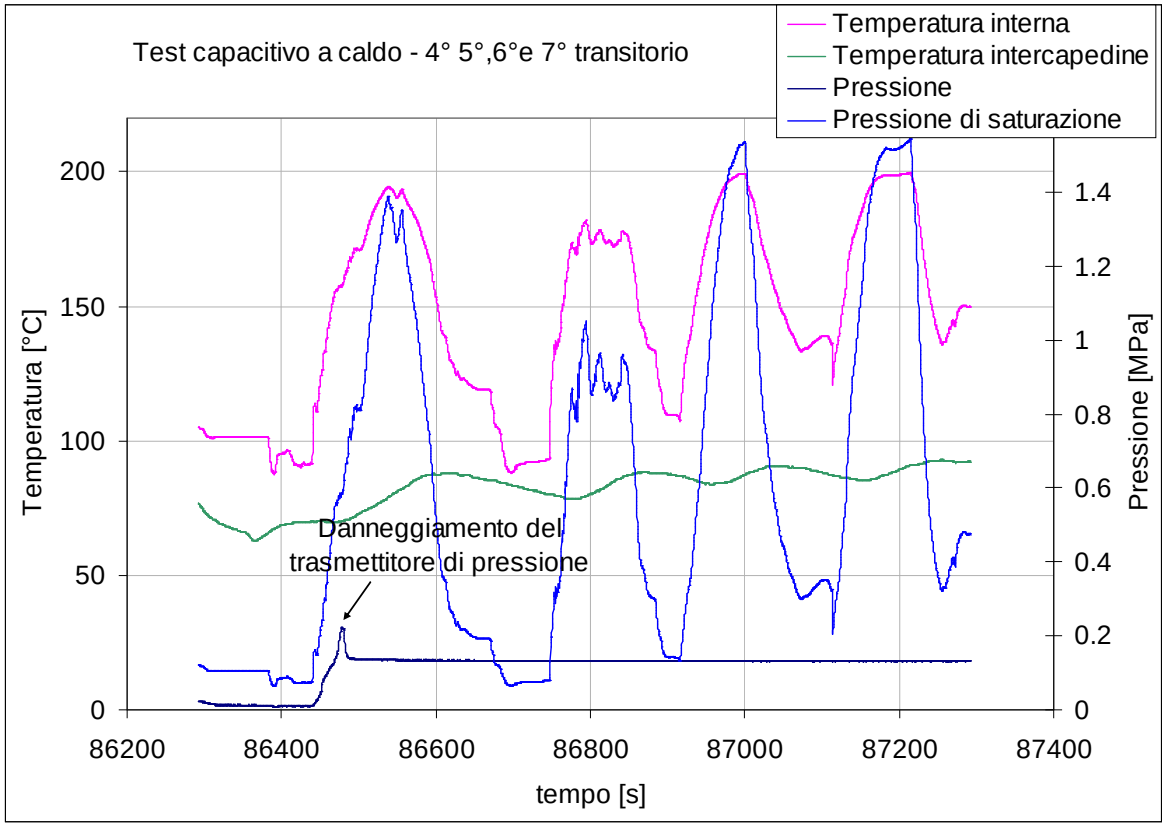


Fig. 104 – Test a caldo: Quarto, quinto, sesto e settimo transitorio di temperatura e pressione

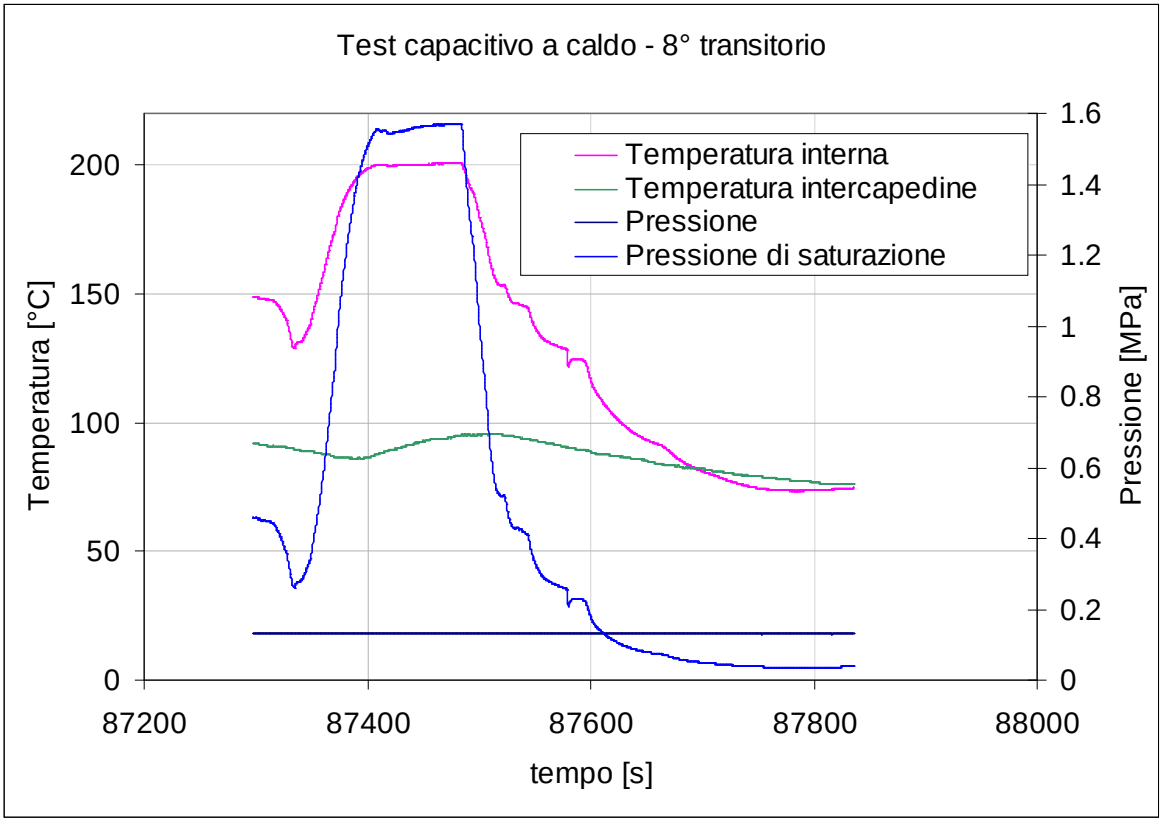


Fig. 105 – Test a caldo: Ottavo transitorio di temperatura e pressione

8 CONCLUSIONI

Le prove eseguite sui prototipi a caldo e a freddo della sonda capacitiva, per la misura del grado di vuoto di miscele acqua-aria e acqua-vapore, hanno consentito di verificare il principio di funzionamento e la messa a punto del sistema sviluppato alla SIET, per applicazioni sulle linee di rottura dell'impianto sperimentale SPES-3.

La caratterizzazione del prototipo a freddo, operata in condizioni statiche, ha consentito di evidenziare una buona sensibilità del sistema nel rilevare la presenza di acqua.
Le prove statiche e quelle con flusso bifase, svolte presso il politecnico di Torino, hanno confermato i risultati e consentito una prima analisi dei dati finalizzata alla definizione di correlazioni tra il segnale elettrico ed il grado di vuoto misurato.
Un elemento critico, emerso durante le prove, è l'effetto della conduttività elettrica dell'acqua, infatti, per non avere saturazione del segnale, l'acqua deve essere demineralizzata con conduttività minore di 10 μS/cm.
Restano alcune incertezze su fenomeni di deriva del segnale legati all'influenza di parametri ambientali ed elettromagnetici.

Il prototipo operante a caldo ha superato le prove di collaudo alle condizioni di progetto, dal punto di vista meccanico e di resistenza a pressione e a temperatura. E' stato verificato anche che il valore di temperatura nella zona in cui vanno installate le schede elettroniche con i reed relè, è 'sufficientemente basso ed adeguato all'installazione delle stesse.
Per le prove a caldo, non è stato possibile stabilire un legame tra segnale elettrico e grado di vuoto, in quanto il circuito su cui è stata provata la sonda non dispone di valvole rapide per la misura del grado di vuoto medio di sezione, in condizioni di flussi stazionari.

Sulla base dei risultati ottenuti alla SIET e al Politecnico di Torino, il prototipo a freddo necessita di una ulteriore fase sperimentale, da effettuare presso il circuito già allestito al Politecnico, per mettere a punto le correlazioni tra segnale elettrico e grado di vuoto, e presso la SIET per ulteriori prove in posizione orizzontale. Per queste ultime, è previsto l'uso della sonda a caldo, da usare a freddo, in modo da verificare l'elettronica con 16 elettrodi su tutta la superficie del tubo.

Il prototipo a caldo necessita inoltre di essere provato con miscela acqua-vapore, in condizioni stazionarie, con le stesse modalità sperimentate sul circuito acqua-aria del Politecnico di Torino. Le prove dovrebbero essere eseguite presso i laboratori della SIET, che dispone di acqua e vapore alle condizioni prototipiche, sullo stesso circuito utilizzato per il collaudo a caldo. Per eseguire tali prove, il circuito deve essere modificato, dotandolo di valvole rapide, per effettuare misure del grado di vuoto medio e correlarle ai relativi segnali elettrici.

9 BIBLIOGRAFIA

[1] SIET 01 572 RT 09 Rev.0: Two-phase flow measurement for SPES3 facility: spool piece mathematical correlations, 14/07/2010.

[2] SIET 01 605 ST 10 Rev.0: Strumentazione Speciale per l'Impianto Sperimentale SPES-3, 14/07/2010.

[3] SIET 01 525 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements: Technical Specifications, 14/07/2010.

[4] SIET 01 651 ST 10 Rev.0: Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore, 24/09/2010.

[5] M. Uematsu, E. U. Franck, Static Dielectric Constant of Water and Steam, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 9, No. 4, 1980.

[6] M. De Salve, G. Monni, B. Panella: Caratterizzazione di una sonda Capacitiva in deflusso verticale ascendente aria-acqua, Politecnico di Torino- Dipartimento di Energetica, CERSE-POLITO RL 1260-I/2011, luglio 2011.

Allegato 1

Caratteristiche della scheda di acquisizione dati

NATIONAL INSTRUMENTS

Ufficio vendite
Italia
02 41309.1 (Milano), 06
520871begin_of_the_skype_highlighting
520871 end_of_the_skype_highlighting
(Roma)
ni.italy@ni.com

NI USB-6259

16-Bit, 1.25 MS/s M Series Multifunction DAQ, External Power

- 32 input analogici (16-bit), 1,25 MS/s single-channel (1 MS/s aggregata)
- 4 output analogici (16 bit, 2,8 MS/s), 48 I/O digitali (32 sincronizzate), due contatori a 32 bit
- Utilizzare la versione con terminazione a massa con condizionamento del segnale SCC
- Funzioni per il trasferimento del segnale NI per il trasferimento dei dati a velocità elevata tramite USB; versione OEM disponibile
- Compatibile con LabVIEW, LabWindows/CVI e Measurement Studio per Visual Studio .NET
- NI-DAQmx driver software e il software data-logging interattivo NI LabVIEW SignalExpress LE

Panoramica

NI USB-6259 è un modulo DAQ di acquisizione dati multifunzione ad alta velocità della Serie M ottimizzato per ottenere maggiore accuratezza a frequenze di campionamento elevate. NI USB-6259 è ideale per le applicazioni come l'acquisizione del segnale dinamico e per le misure dei sensori quando il dispositivo è utilizzato con il condizionamento del segnale NI.

NI USB-6259 è stato progettato appositamente per le applicazioni dei sistemi portatili o di piccole dimensioni. Grazie all'installazione plug-and-play, i tempi di configurazione e di impostazione risultano estremamente ridotti, mentre la connettività diretta dei terminali a vite mantiene i costi ridotti e semplifica i collegamenti del segnale. NI-DAQmx driver e il software dei servizi per la misura includono semplici interfacce di configurazione e programmazione con funzioni come DAQ Assistant che consentono di ridurre i tempi di sviluppo.

Questo modulo include anche le nuove funzioni di trasferimento del segnale NI che permettono il trasferimento bidirezionale dei dati di tipo DMA ad alta velocità tramite bus USB. Per maggiori informazioni sulla trasmissione del segnale NI, consultare la barra delle risorse.

Ogni modulo include anche una versione OEM. Consultare la barra delle risorse oppure la barra di navigazione sulla sinistra per ottenere informazioni tecniche e sui prezzi.

Driver Software

NI-DAQmx driver e il software dei servizi per la misura includono semplici interfacce di configurazione e programmazione con funzioni come DAQ Assistant che consentono di ridurre i tempi di sviluppo. Consulta le informazioni riportate sulla barra delle risorse per maggiori informazioni sul driver software oppure per scaricare i driver. I dispositivi della Serie M non sono compatibili con il driver (Legacy) Traditional NI-DAQ.

Software applicativo

Ogni dispositivo di acquisizione dati della Serie M include una copia di NI LabVIEW SignalExpress LE per l'acquisizione veloce, l'analisi e la presentazione dei dati senza bisogno di programmazione. Oltre a LabVIEW SignalExpress, i dispositivi di acquisizione

della Serie M sono compatibili anche con le seguenti versioni (o superiori) del software applicativo NI – LabVIEW 7.1, LabWindows™/CVI 7.x e Measurement Studio 7.x. I dispositivi di acquisizione dati della Serie M sono compatibili anche con Visual Studio .NET, C/C++ e

Visual Basic 6.

Specifiche

Documenti di specifica

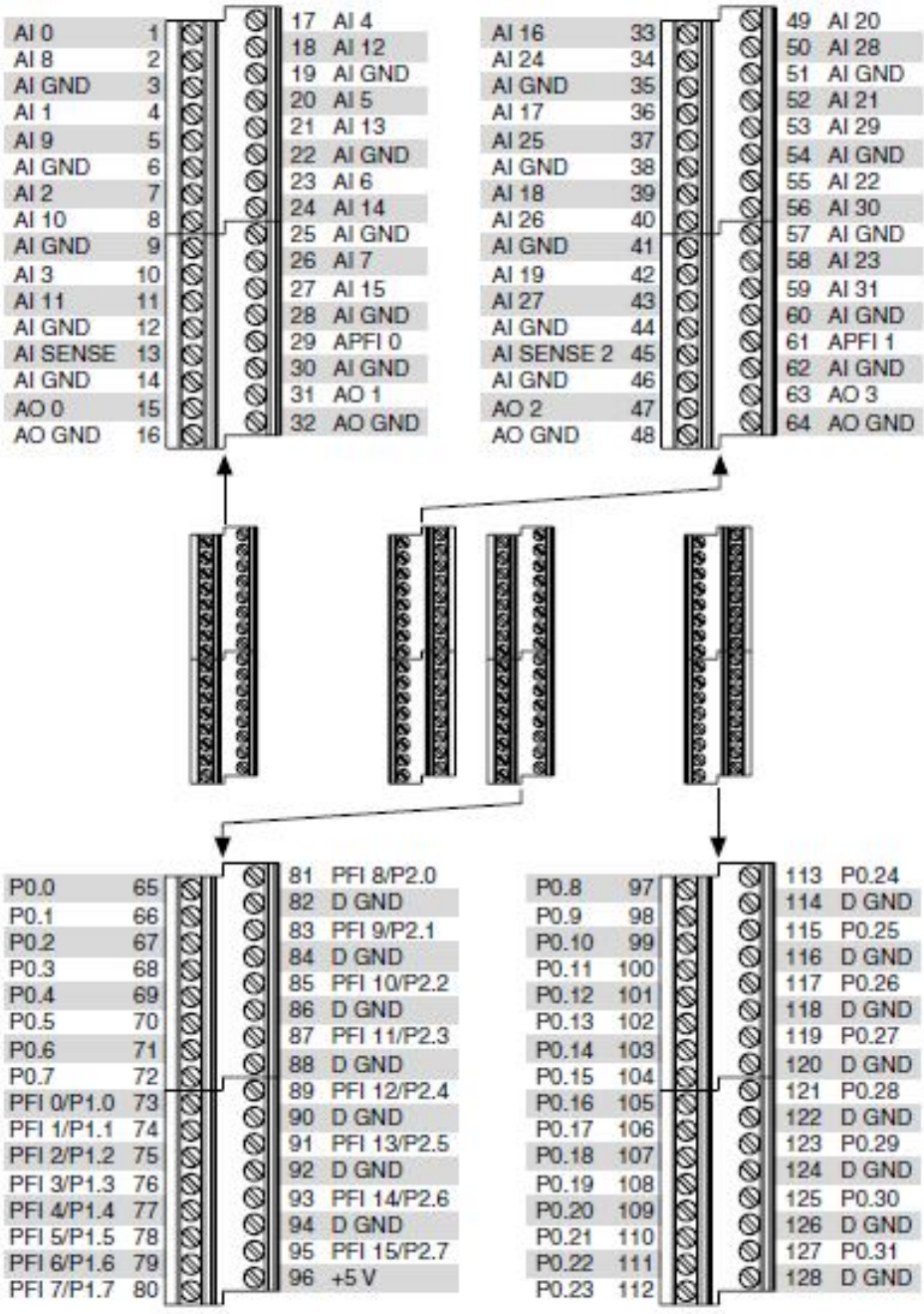
- Specifiche tecniche (2)
- Data Sheet

Riepilogo specifiche

Generale	
Prodotti	USB-6259
Famiglie di prodotti	Multifunction Data Acquisition
Formato	USB
Codice Prodotto	779628-01 , 779628-02 , 779628-03 , 779628-04 , 779628-06 , 779628-07
Sistema operativo/Target	Windows
Famiglie di prodotti DAQ	M Serie
Tipi di misura	Encoder in Quadratura , Tensione
Conformità ROHS	Si
Input analogico	
Canali	32 , 16
Single-Ended Channels	32
Differential Channels	16
Risoluzione	16 bits
Frequenza di campionamento	1.25 MS/s
Massima tensione analogica in ingresso	10 V
Intervallo massimo di tensione	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	1.92 mV
Maximum Voltage Range Sensitivity	112 µV
Intervallo minimo di tensione	-100 mV , 100 mV
Minimum Voltage Range Accuracy	52 µV
Minimum Voltage Range Sensitivity	6 µV
Numero di intervalli	7

Campionamento simultaneo	No
Memoria su scheda	4095 campionamenti
Output analogico	
Canali	4
Risoluzione	16 bits
Massima tensione analogica in uscita	10 V
Intervallo massimo di tensione	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	2.08 mV
Intervallo minimo di tensione	-5 V , 5 V
Minimum Voltage Range Accuracy	1.045 mV
Intervallo di frequenza	2.86 MS/s
Current Drive Single	5 mA
Current Drive All	20 mA
I/O digitale	
Bidirectional Channels	48
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Numero di canali	48 , 0 , 0
Temporizzazione	Hardware , Software
Massima frequenza di clock	1 MHz
Livelli di logica	TTL
Flusso di corrente input	Sinking , Sourcing
Flusso di corrente output	Sinking , Sourcing
Filtri di input programmabile	Si
Supporta gli stati di accensione (power-up states) programmabili?	Si
Current Drive Single	24 mA
Current Drive All	1 A
Timer watchdog	No
Supporta I/O Handshake?	No
Supporta I/O Pattern?	Si
Intervallo input massimo	0 V , 5 V

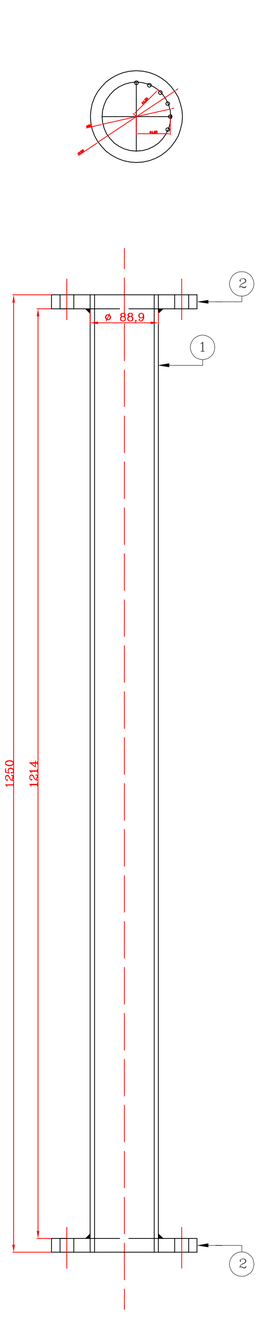
Intervallo output massimo	0 V , 5 V
Contatori/Timer	
Numero di Contatori/Timer	2
Operazioni in buffer	Si
Rimozione interruzioni ed errori	Si
Sincronizzazione GPS	No
Intervallo massimo	0 V , 5 V
Frequenza di origine massima	80 MHz
Generazione impulsi	Si
Risoluzione	32 bits
Stabilità timebase	50 ppm
Livelli di logica	TTL
Specifiche fisiche	
Lunghezza	28.67 cm
Ampiezza	17.09 cm
Altezza	4.45 cm
Connettore I/O	Terminali con vite
Temporizzazione/Triggering/Sincronizzazione	
Trigger	Analogico , Digitale
Bus di sincronizzazione (RTSI)	No

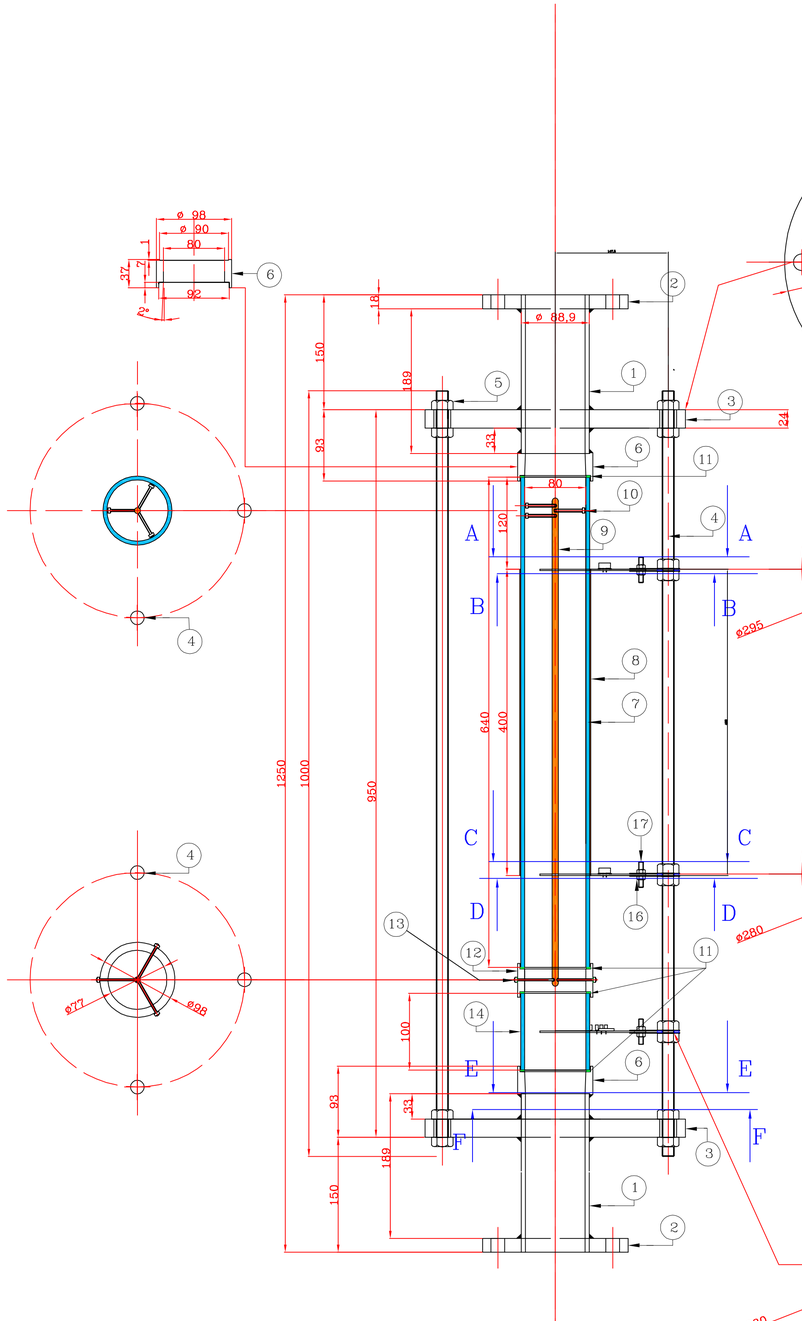

AI 0 1
AI 8 2
AI GND 3
AI 1 4
AI 9 5
AI GND 6
AI 2 7
AI 10 8
AI GND 9
AI 3 10
AI 11 11
AI GND 12
AI SENSE 13
AI GND 14
AO 0 15
AO GND 16
17 AI 4
18 AI 12
19 AI GND
20 AI 5
21 AI 13
22 AI GND
23 AI 6
24 AI 14
25 AI GND
26 AI 7
27 AI 15
28 AI GND
29 APFI 0
30 AI GND
31 AO 1
32 AO GND
AI 16 33
AI 24 34
AI GND 35
AI 17 36
AI 25 37
AI GND 38
AI 18 39
AI 26 40
AI GND 41
AI 19 42
AI 27 43
AI GND 44
AI SENSE 2 45
AI GND 46
AO 2 47
AO GND 48
49 AI 20
50 AI 28
51 AI GND
52 AI 21
53 AI 29
54 AI GND
55 AI 22
56 AI 30
57 AI GND
58 AI 23
59 AI 31
60 AI GND
61 APFI 1
62 AI GND
63 AO 3
64 AO GND
P0.0 65
P0.1 66
P0.2 67
P0.3 68
P0.4 69
P0.5 70
P0.6 71
P0.7 72
PFI 0/P1.0 73
PFI 1/P1.1 74
PFI 2/P1.2 75
PFI 3/P1.3 76
PFI 4/P1.4 77
PFI 5/P1.5 78
PFI 6/P1.6 79
PFI 7/P1.7 80
81 PFI 8/P2.0
82 D GND
83 PFI 9/P2.1
84 D GND
85 PFI 10/P2.2
86 D GND
87 PFI 11/P2.3
88 D GND
89 PFI 12/P2.4
90 D GND
91 PFI 13/P2.5
92 D GND
93 PFI 14/P2.6
94 D GND
95 PFI 15/P2.7
96 +5 V
P0.8 97
P0.9 98
P0.10 99
P0.11 100
P0.12 101
P0.13 102
P0.14 103
P0.15 104
P0.16 105
P0.17 106
P0.18 107
P0.19 108
P0.20 109
P0.21 110
P0.22 111
P0.23 112
113 P0.24
114 D GND
115 P0.25
116 D GND
117 P0.26
118 D GND
119 P0.27
120 D GND
121 P0.28
122 D GND
123 P0.29
124 D GND
125 P0.30
126 D GND
127 P0.31
128 D GND

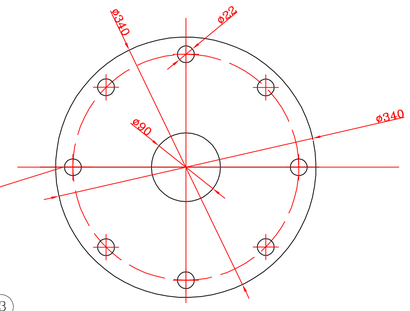
Allegato 2

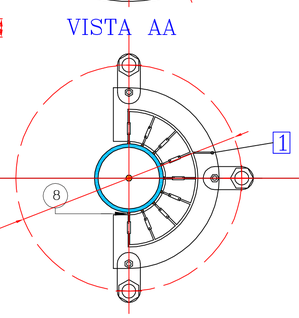
Disegno 077.00.00 rev0

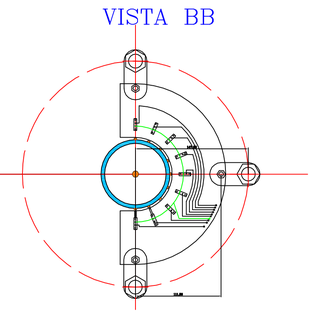
Strumento capacitivo per basse pressioni e basse temperature. Disegno esecutivo

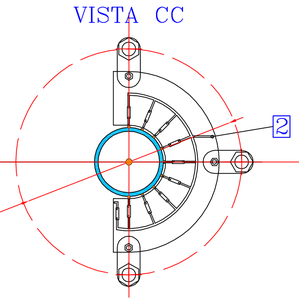


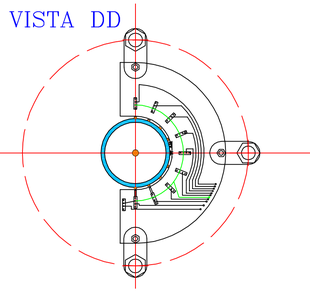


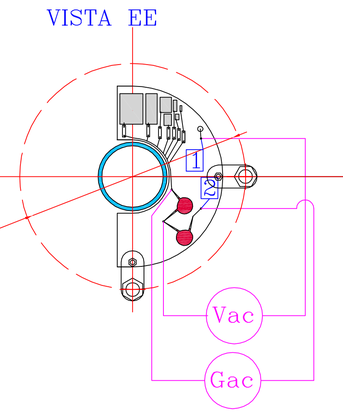


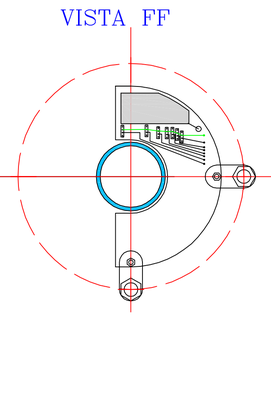




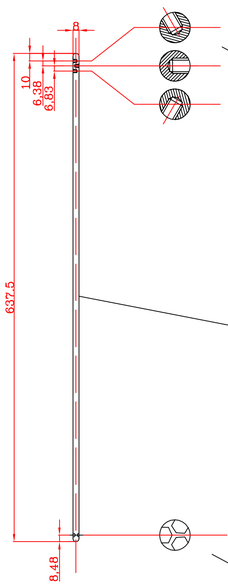








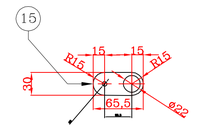
ELETTRODO CENTRALE

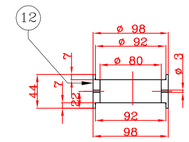


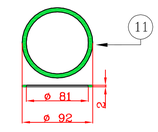
Tre fori filettati 4MA per una profondità del filetto di almeno 4 mm posti a quote diverse e ruotati di 120 °

Tondo pieno in AISI 304 diemetro esterno 8 mm lungheza totale 637.5 mm con finitura semisferica medinte tornitura delle estremità

Tre fori lisci e ciechi con terminazione a cono, diametro 4 mm profondità totale 3–3.5 mm posti su uno stesso piano a 120° l'uno dall'altro







Il circuito stampato relativo alle sezioni EE ed FF è stato rimosso, in quanto è stata adottata lo schema circuitale presente in Fig. 17 di [5]

POS.	DENOMINAZIONE	N° PEZZI	MATERIALE	NOTE
17	DADO M5	9	A533B	
16	BULLONE M5 X 20mm	9	A533B	
15	SOSTEGNI OVALI PER BASETTE	16	ASTM AISI 304	MACHINED
14	TUBO ø90 /80 L=100mm	1	PLEXIGAS	
13	SPINA CENTRAGGIO M3x 46mm	3	ASTM AISI 304	
12	ANELLO INTERCONNESSIONE PLEXIGLAS	1	ASTM AISI 304	MACHINED
11	GUARNIZIONE ø 92/81 SP. 2	4	SPIROMETALLICA	
10	SPINA CENTRAGGIO M4X34mm	3	ASTM AISI 304	
9	ELETTRODO CENTRALE ø 8mm L=637mm	1	CU	
8	ELETTRODO LAMINA L=400x4mm	9	CU	
7	TUBO ø90 /80 L=640mm	1	PLEXIGAS	
6	DISCO TERMINALE ZONA TUBI INOX	2	ASTM A234 WPB	
5	DADO M18	50	A533B	
4	TIRANTE M16X1000mm	8	A533B zincato	
3	FLANGIA DISTANZIATRICE 8" PN10-6092 type 05	2	ASTM AISI 304	MACHINED
2	FLANGIA TERMINALE 3" PN6-2276 type 01	2	ASTM AISI 304	
1	TUBO 3" SCH. 40: 2x 189mm, 1x1214mm	3	ASTM AISI 304	

Rev.	Date	Modified	Dftm.	Controll.	Approv.

0	14/09/2010	DRAFT	Greco, Achilli		

SIET sperimentiamo le tue idee
Piacenza – Italy

Strumentazione Speciale

Strumento Capacitivo per basse pressioni e basse temperature – disegno esecutivo

Scale	Dwg code	File	General code
1:4	077.00.00	077.00.00rev0.dwg	

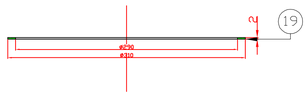
File name:

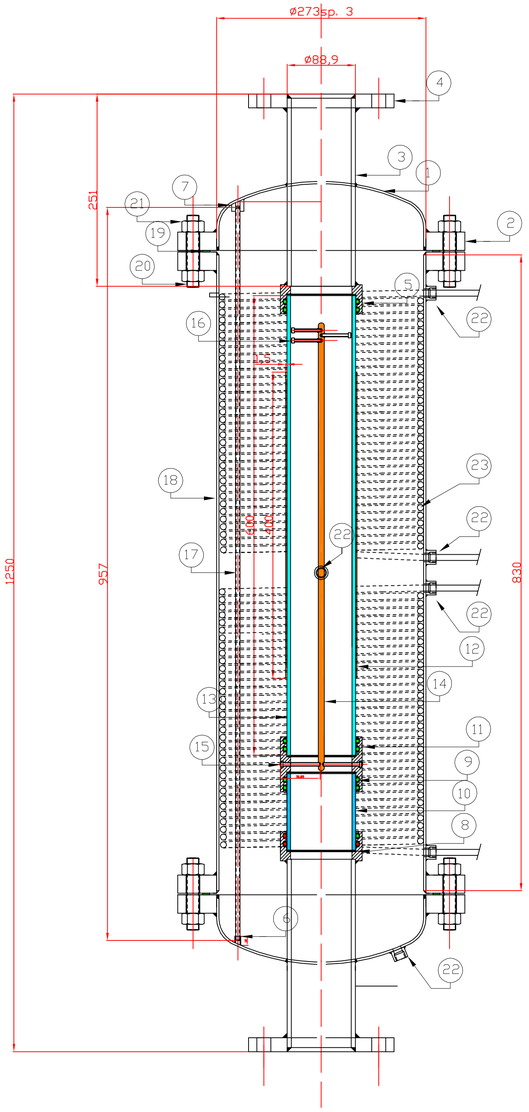
A1

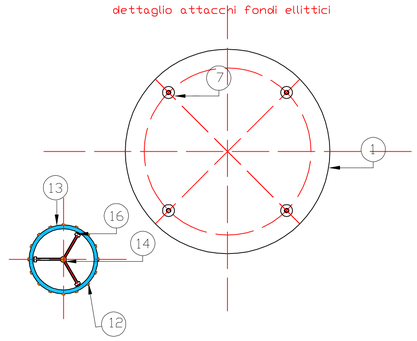
Allegato 3

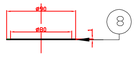
Disegno 077.01.00/1 rev1
Strumento capacitivo
Caratteristiche Pmax = 15 bar, Tmax = 201 °C
Disegno esecutivo

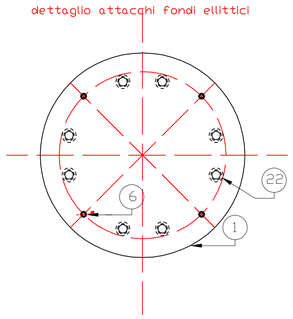
Disegno 077.01.00/2 rev1
Strumento capacitivo – dettaglio cave
Caratteristiche Pmax = 15 bar, Tmax = 201 °C
Disegno esecutivo

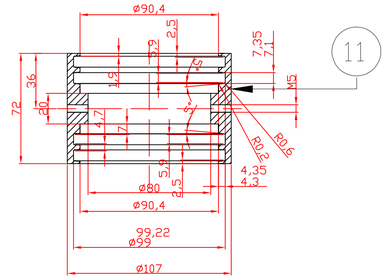


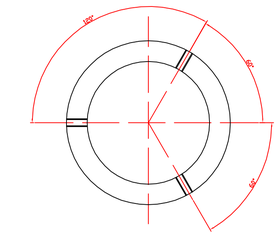


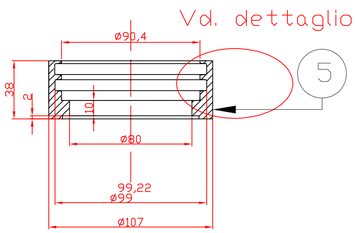


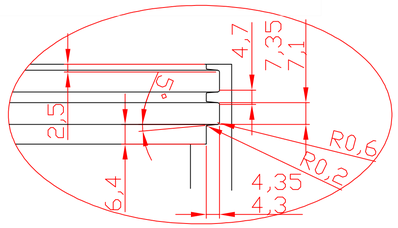




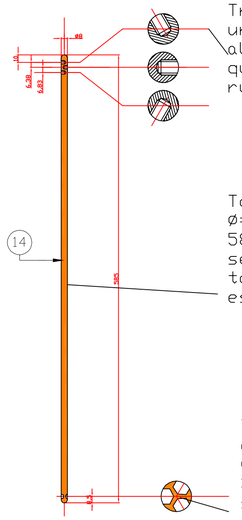








ELETTRODO CENTRALE



Tre fori ø=3 mm per una profondità di almeno 4 mm posti a quote diverse e ruotati di 120°

Tondo pieno in AISI 304 ø=8 mm lungheza totale 585 mm con finitura semisferica mediante tornitura delle estremità

Tre fori lisci e ciechi con terminazione a cono, ø=5 mm profondità totale 3-3.5 mm posti su uno stesso piano a 120° l'uno dall'altro

POS.	DENOMINAZIONE	N° PEZZI	MATERIALE	NOTE
23	spire di raffreddamento in tubo 8x1	2	RAME RICOTTO	
22	Manicotto filettato 1/4"	14	ASTM AISI 304	
21	DADO M16	48	ASTM AISI 304	
20	TIRANTE M16X94 mm	24	ASTM AISI 304	
19	GUARNIZIONE ø 310/290 SP. 2	2	SPIROMETALLICA	MACHINED
18	TUBO SALDATO ø 273 SP. 3 MM. L=830 mm	1	ASTM AISI 304	
17	TIRANTE M8X957 mm	4	ASTM AISI 304	
16	SPINA CENTRAGGIO M5x34 mm	3	ASTM AISI 304	MACHINED
15	SPINA CENTRAGGIO M5x54 mm	3	ASTM AISI 304	MACHINED
14	ELETTRODO CENTRALE ø 8mm L=585mm	1	AISI 304	
13	TUBO ø90 /80 L=600mm	1	VETRO	MACHINED
12	ELETTRODO LAMINA L=400x4mm sp. 1.5 mm	16	ASTM AISI 304	
11	ALLOGGIAMENTO TUBO VETRO INTERMEDIO	1	ASTM AISI 304	MACHINED
10	TUBO ø90 /80 L=100mm	1	VETRO	
9	GUARNIZIONE O-RING ø 90 ø 5.34 mm	8	VITON	
8	GUARNIZIONE ø 90/80 SP. 2	4	Gomma siliconica	
7	MEZZO MANICOTTO ½" SERIE 3000	4	ASTM A234 WPB	
6	TUBO MANOMETRICO ø8/6 L=12 mm	4	ASTM AISI 304	
5	ALLOGGIAMENTO TUBO VETRO TERMINALE	2	ASTM AISI 304	MACHINED
4	FLANGIA TERMINALE 3" PN6-2276 type 01	2	ASTM AISI 304	
3	TUBO 3" SCH. 40 L= 246 mm	2	ASTM AISI 304	
2	FLANGIA PIANA 10" PN6-2276 type 01	4	ASTM A 182 F304	
1	FONDO ELLITTICO 2:1 ø 273 SP. 3 MM.	2	ASTM AISI 304	

Rev.	Date	Modified	Dftm.	Controll.	Approv.

1	22/08/2011	ISSUE	Achilli		
0	14/09/2010	DRAFT	Greco, Achilli		

SIET sperimentiamo le tue idee
Piacenza – Italy

Strumentazione Speciale

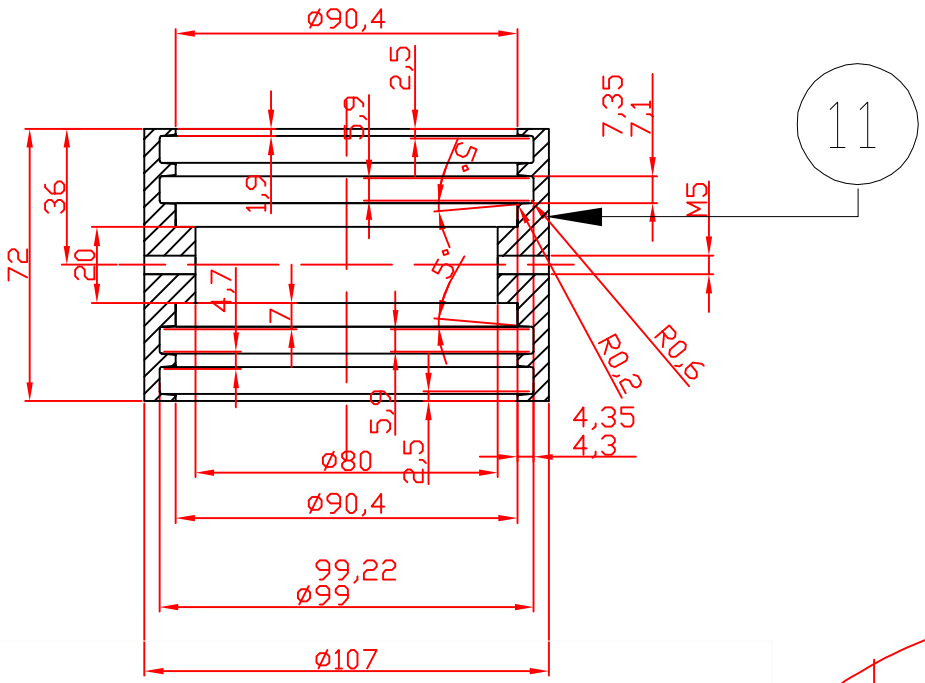
Strumento Capacitivo - disegno esecutivo

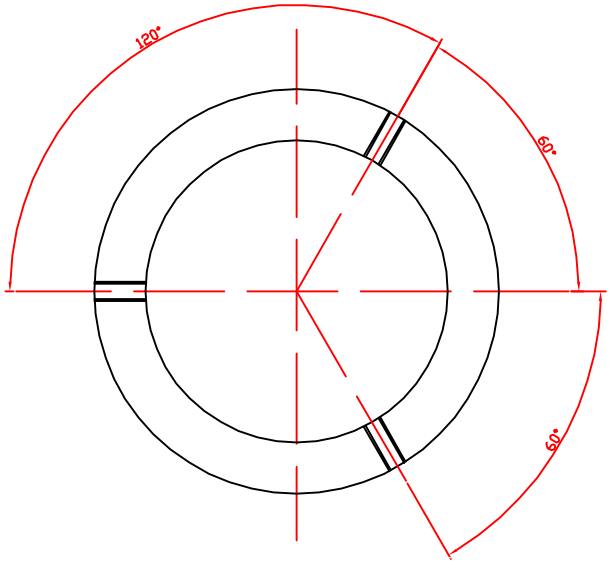
Caratteristiche: Pmax=15 bar, Tmax=201°C

Scale	Dwg code	File	General code
1:4	077.01.00/1	077.01.00rev1.dwg	

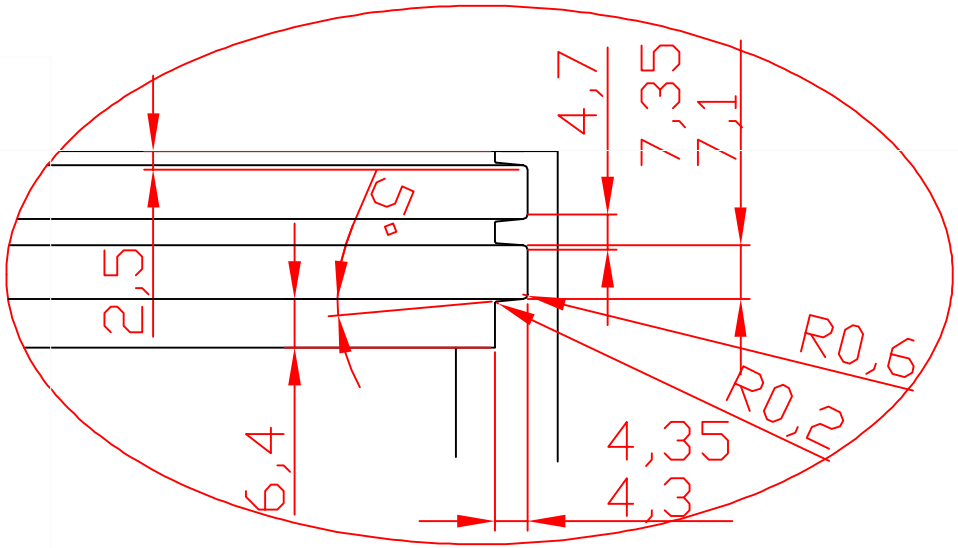
File name:

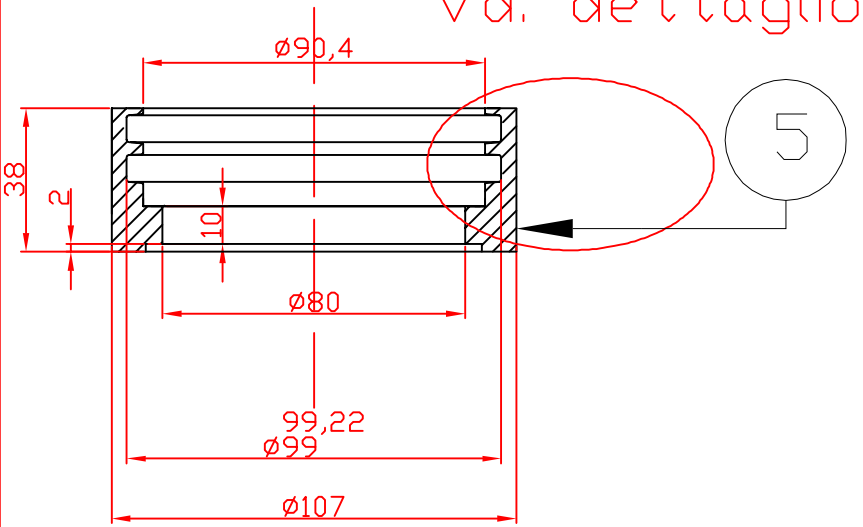
A1





Vd. dettaglio





11	ALLOGGIAMENTO TUBO VETRO INTERMEDIO		1	ASTM AISI 304	MACHINED
5	ALLOGGIAMENTO TUBO VETRO TERMINALE		2	ASTM AISI 304	MACHINED
POS.	DENOMINAZIONE		N° PEZZI	MATERIALE	NOTE
1	22/08/2011	ISSUE	Achilli		
0	14/09/2010	DRAFT	Greco, Achilli		
Rev.	Date	Modified	Dftm.	Controll.	Approv.

SIET

Piacenza – Italy

Strumentazione Speciale

Strumento Capacitivo - dettaglio cave

Caratteristiche: Pmax=15 bar, Tmax=201°C

Scale	Dwg code	File	General code
1:1 A4	077.01.00/2	077.01.00rev1.dwg	