

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE
DEI*

INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

in
Tecnica Delle Alte Tensioni

**STUDIO DELLE CARICHE DI SPAZIO IN CAVI
MODELLO E FULL SIZE TRAMITE METODO
DELL'IMPULSO ELETTROACUSTICO (PEA)**

CANDIDATO
Dario Pini

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Giovanni Mazzanti

CORRELATORE/CORRELATORI:
Ing. Stefano Franchi Bononi
Ing. Ivan Troia
Ing. Simone Giannini

Anno Accademico 2016/2017

Sessione III

1. INTRODUZIONE.....	1
2. CARATTERISTICHE DEL CAMPO ELETTRICO IN DC.....	13
2.1 Il Fenomeno dell’Inversione di Campo Elettrico	15
2.2 Il Fenomeno di Accumulo di Carica Spaziale.....	19
2.3 La ricerca.....	20
3. I MATERIALI POLIMERICI E LA FORMAZIONE DI CARICA DI SPAZIO	10
3.1 I polimeri e la loro struttura	10
3.1.1 Tipi di polimeri	11
3.1.2 Cristallinità dei polimeri	13
3.1.3 Polietilene (PE) e Polietilene reticolato (XLPE)	15
3.2 La conducibilità e il modello a bande	16
3.3 Il moto delle cariche nei polimeri	20
3.3.1 Iniezione della carica	26
3.3.2 Accumulo della carica.....	27
3.3.3 L’effetto del campo elettrico nei processi di conduzione	29
3.4 La rigidità elettrica e l’invecchiamento nei materiali.....	33
3.4.1 Rigidità dielettrica.....	34
3.4.2 Invecchiamento elettrico	37
4. MISURA DELLA CARICA DI SPAZIO: IL METODO PEA	61
4.1 Metodi basati sulle sollecitazioni termiche	62
4.1.1 Metodo dell’impulso termico TPM (Thermal Pulse Method)	62
4.1.2 Metodo del laser ad intensità modulata L IMM (Laser Intensity Modulation Method)	64
4.1.3 Metodo del gradiente termico TSM (Thermal Step Method)	65
4.2 Metodi basati sulla propagazione delle onde di pressione	69
4.2.1 Metodo di propagazione dell’onda di pressione PWP (Pressure Wave Propagation)	71
4.2.2 Metodo dell’impulso di pressione indotto dal Laser LIPP (Laser Induced Pressure Pulse method LIPP).....	72
4.2.3 Metodo del Piezo/Piezo trasduttore	74
4.2.4 Metodo dell’impulso elettro-acustico PEA (Pulse Electro-Acoustic method)	74

4.3	Aspetti teorici del metodo PEA.....	77
4.3.1	La formazione dell'onda acustica	81
4.3.2	Propagazione dell'onda di pressione	83
4.3.2	Segnale di uscita dal trasduttore piezoelettrico.....	91
4.3.3	Il sistema di amplificazione del segnale	92
4.3.4	Deconvoluzione e calibrazione del segnale	93
4.3.5	Effetto dello spessore del trasduttore e della durata dell'impulso	95
4.3.6	Attenuazione e dispersione dell'onda acustica	102
5.	APPARATO DI MISURA ED ELABORAZIONE DATI.....	109
5.1	La cella PEA.....	111
5.2	Il generatore d'impulso di tensione.....	115
5.2.1	Accoppiamento dell'impulso elettrico.....	119
5.3	I generatori HVDC	125
5.4	L'oscilloscopio	127
5.6	Programma per l'acquisizione dei dati.....	128
5.7	Programma per l'elaborazione dei dati	134
5.7.1	La calibrazione del segnale.....	139
5.7.2	Calcolo del campo elettrico Poissoniano e della tensione nota la distribuzione di carica spaziale.....	141
5.7.3	Deconvoluzione del segnale	143
6.	REALIZZAZIONE DELLE MISURE PEA NEI CAVI MODELLO.....	151
6.1	Test di misura su cavo a U	154
6.2	Test di misura su cavo modello di 10m e terminali da 100 kV.....	162
6.3	Test di misura su cavo modello di 10m e terminali da 300 kV.....	171
6.4	Test di verifica dell'impedenza del collegamento verso terra.....	179
6.5	Test di verifica della risposta del sistema PEA al variare della durata dell'impulso di eccitazione	184
6.6	Test su cavi per verificare la possibilità di osservare la distribuzione di carica	187
6.6.1	Polarità positiva	187
6.6.2	Polarità negativa.....	194

7. CAMPO ELETTRICO DEL METODO PEA.....	203
7.1 Effetto della carica di spazio sul campo elettrico DC nei cavi a temperatura ambiente	205
7.1.1 Valutazione del campo con il metodo della simulazione.....	205
7.1.2 Valutazione del campo con il metodo della conversione del pattern.....	210
7.2 Effetto combinato gradiente termico-carica di spazio sul campo elettrico	212
8. LE MISURE PEA SUI CAVI FULL SIZE – IL PROGETTO IFA2.....	217
8.1 Il progetto IFA2.....	217
8.2 Modalità di prova	219
8.3 Setup della misura	221
8.4 Misura preventiva.....	222
8.5 La campagna di misure PEA	224
8.5.1 Misure PEA sul cavo1	224
8.5.2 Misure PEA sul cavo2 e cavo3	240
9. CONCLUSIONI.....	261
9.1 I cavi modello.....	261
9.2 Il campo elettrico.....	263
9.3 I cavi full size	266
9.3.1 Spessore dell'elettrodo.....	267
9.3.2 I disturbi.....	268
9.3.3 Il problema delle risorse e del tempo	269
9.4 Considerazioni finali	270
9.5 Soluzioni migliorative	272
10. BIBLIOGRAFIA	273



INTRODUZIONE

Capitolo 1

Il seguente capitolo dà una breve descrizione sui sistemi elettrici per il trasporto dell'energia focalizzandosi sui sistemi HVDC. Verrà inoltre data un'immagine sull'evoluzione storica di questi sistemi e sulle loro caratteristiche economiche e tecniche.

1. INTRODUZIONE

Nonostante i primi sistemi elettrici fossero basati sulla corrente continua, i sistemi per la trasmissione di energia elettrica si sono sviluppati principalmente in corrente alternata. Questo è dovuto ai numerosi vantaggi che la corrente alternata presenta nei confronti di quella continua, non per ultimo la facilità di trasformazione, grazie all'utilizzo dei trasformatori. Questo ha fatto sì che le applicazioni di cavi HVDC (acronimo dall'inglese: *High Voltage Direct Current*) fossero rilegate ai soli cavi marini; questo perché le pezzature dei cavi sono estremamente lunghe e i parametri capacitivi impediscono l'utilizzo della AC.

Oggi giorno però l'utilizzo dei sistemi in DC è sempre più largamente utilizzato sia per necessità che per funzionalità. La necessità si ha in quanto, oltre ad una certa lunghezza della connessione, non è più possibile utilizzare la AC per via delle perdite nel cavo; per le connessioni di lunghezza compresa fra i 50 e i 100 chilometri i due tipi di sistema sono comparabili, oltre i 100 chilometri viene invece utilizzata la DC. Si ha quindi lo svincolarsi della lunghezza massima della linea dalle correnti capacitive verso terra. La funzionalità invece è data dalla possibilità di utilizzare convertitori sia di corrente che di tensione, in tal modo si possono sfruttare vari metodi per migliorare i transiti di potenza nelle linee. A livello economico si ha ancora una volta un vantaggio, in quanto i cavi DC sono più economici di quelli AC di uguale portata.

Le linee di trasmissione possono essere linee aeree o linee in cavo. Non v'è dubbio sul fatto che le linee aeree siano la soluzione economicamente più vantaggiosa, vi è però da considerare l'impatto ambientale e la necessità di grandi spazi liberi che queste richiedono. Infatti la visione attuale è quella di avere installazioni ad impatto visivo minimo garantito da cavi sotterranei, non visibili all'occhio; le linee in cavo non sono solo una soluzione alle richieste ecologico, ma sono anche le uniche soluzioni possibili in alcuni contesti, basti pensare alla necessità di dover attraversare vaste aree urbane dove l'unico spazio disponibile è nel sottosuolo.

Vi è poi da dire che i costi di installazione delle linee in cavo vengono notevolmente ridotti quando sia possibile integrare queste in corridoi di trasporto già esistenti, come ferrovie, autostrade o linee metropolitane. Ovviamente tale integrazione richiede un particolare studio sulla compatibilità dell'installazione con l'ambiente circostante e sulla sicurezza.

Facendo invece un confronto fra la trasmissione di energia in DC e in AC si possono elencare i vantaggi e gli svantaggi che caratterizzano ogni sistema. I sistemi HVDC hanno degli svantaggi che rendono la trasmissione in DC sempre più appetibile:

1. Introduzione

- Le capacità parassite e l'induttanza delle linee limitano la distanza di trasmissione così come la capacità di trasmissione.
- Come già detto tale limitazione è particolarmente stringente per le linee in cavo. La Figura 1.1 rappresenta quale tipo di cavo viene scelto in funzione della lunghezza del collegamento e della potenza impegnata.

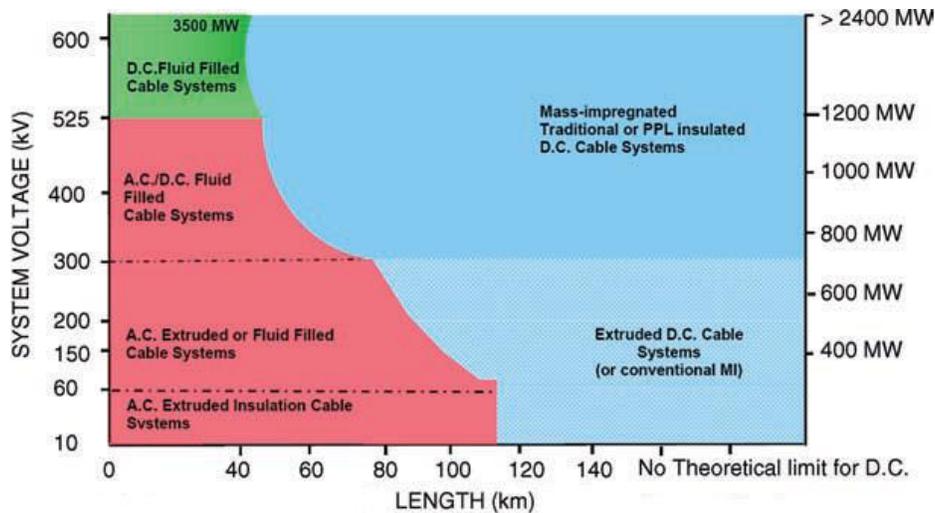


Figura 1.1

Rappresentazione del tipo di cavo e del tipo di trasmissione che conviene usare in funzione della lunghezza, potenza e tensione in gioco per i sistemi di trasmissione

- Impossibilità di collegare due sistemi con frequenza diversa.
- Una debole connessione fra due sistemi indipendenti (poche linee) può dar vita a situazioni di instabilità in una o entrambe le linee, o a flussi di potenza non desiderati.

Dall'altro lato si hanno invece i vantaggi che caratterizzano la trasmissione d'energia nei sistemi HVDC:

- L'assenza dell'effetto pelle fa sì che il conduttore venga utilizzato nella sua totalità, sono assenti anche le perdite negli strati esterni. Inoltre se le correnti superficiali sono trascurabili, come nella maggior parte dei casi, anche le perdite nel dielettrico possono essere considerate nulle.
- Un minor costo della linea a parità di potenza trasmessa.
- La lunghezza della linea non è vincolata dalle correnti di carica e non c'è bisogno di compensare la potenza reattiva del cavo stesso alla fine della linea.

- I cavi HVDC sono meno costosi rispetto al corrispettivo in potenza in HVAC, infatti si hanno dimensioni minori sia del conduttore che dell'isolante.
- Le linee DC non influenzano l'entità delle correnti di cortocircuito alla fine della linea.
- Il controllo dei flussi di potenza è più semplice e rapido.

Come ci si può aspettare anche la trasmissione HVDC ha degli aspetti negativi, la ricerca si sta spingendo in direzione tale da poter ridurre sempre più questi svantaggi:

- Le stazioni di conversione sono molto costose e, proprio nella conversione AC-DC si hanno delle perdite
- La potenza reattiva richiesta dai nodi della rete in AC non è trascurabile ed è stimata come metà della potenza attiva trasmessa. Inoltre la conversione porta alla creazione di armoniche, specialmente nel lato AC, che devono essere eliminate con tecniche apposite o filtri.

La scelta fra HVDC e HVAC è notevolmente influenzata dall'aspetto economico. In Figura 1.2 è fatto un paragone fra i due sistemi. Il costo di ogni impianto è influenzato da numerosi parametri, molti di questi parametri sono tecnici come tensione d'esercizio, potenza trasmessa; altri parametri invece non sono prettamente tecnici come caratteristiche del territorio, parametri sociali, interessi. Per questo motivo fare un paragone fra due sistemi è molto difficile, ciò che si può fare è però un confronto fra le componenti materiali. Si considerano due linee, quello HVAC è caratterizzato da 3 conduttori, mentre quello HVDC è caratterizzato da una configurazione bipolare (due soli conduttori). Come già detto i cavi in DC hanno il vantaggio di aver maggiormente sfruttato il conduttore e godono dell'assenza di perdite, questo fa sì che le dimensioni del conduttore siano minori rispetto al caso AC e quindi anche i sostegni potranno essere più piccoli e meno costosi.

1. Introduzione

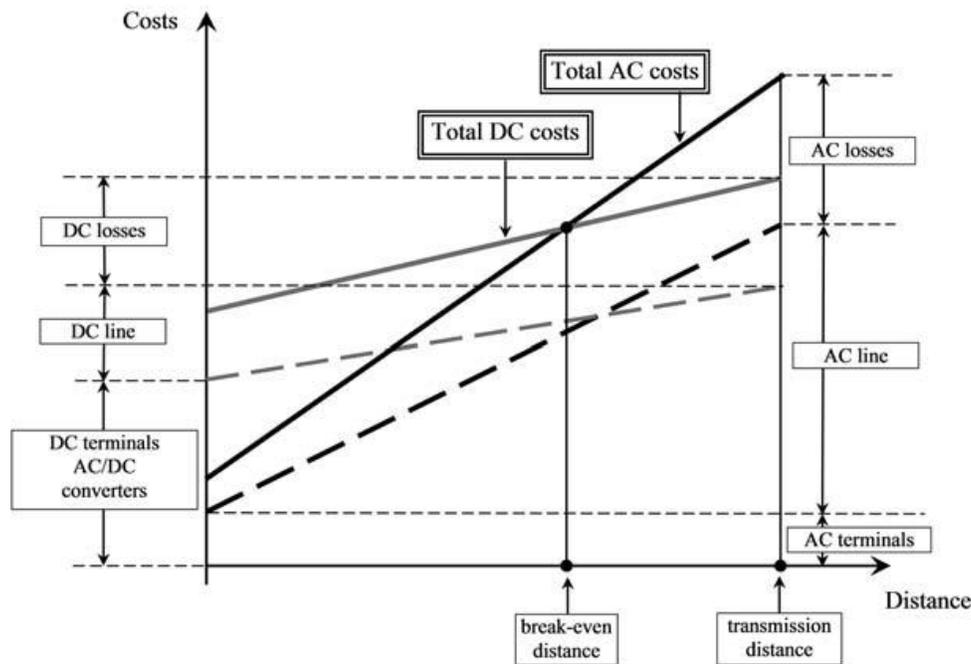


Figura 1.2

Grafico indicativo dei costi per un sistema HVDC (linee grigie) e un sistema HVAC (linee nere). Le linee tratteggiate rappresentano il costo della linea senza considerare le perdite elettriche, la linea continua tiene invece in considerazione i costi dovuti alle perdite.

Nel grafico viene evidenziato il punto che identifica la *break-even distance*, che indica la distanza oltre la quale i costi del sistema in AC superano quelli del sistema in DC. Per le linee aeree questa distanza è dai 500 ai 600 km, anche se come detto il costo è influenzato da altri valori e non solo dalla lunghezza della linea. Per le linee in cavo, invece, la *break-even distance* si riduce a 40-50 km. Come si nota dal grafico il sistema HVDC ha un maggior costo per quanto riguarda le stazioni, il sistema HVAC ha invece un maggior costo dovuto alle perdite e un maggior costo della linea stessa.

Attualmente sono numerose le installazioni di cavi HVDC al mondo. Fra queste si distingue il collegamento SAPEI (SARdegna PENisola Italiana), un collegamento bipolare per la trasmissione di 1000 MW ad una tensione di ± 500 kV. Questo progetto è caratterizzato da una lunghezza dei cavi di 440 km che connettono Fiumesanto a Borgo Sabotino, installati ad una profondità di 1650 m sotto il livello del mare. Questo sistema che attraversa il Mar Tirreno ha il record come cavo più profondo installato al mondo, esso è stato installato dalla Giulio Verne che, a sua volta, detiene il record come la più grande nave posa cavi mondiale. Il progetto, che è italiano sia per l'ubicazione geografica che per la progettazione e produzione del cavo, è stato avviato nel 2006 ed è stato inaugurato nel 2011; questo è

un indice di come, sia gli enti gestori delle linee, che le aziende produttrici di cavi, stiano spingendo la ricerca in questo campo migliorando le prestazioni dei sistemi offerti.



Figura 1.3
Percorso del progetto SAPEI attraverso il Mar Mediterraneo



Figura 1.4
Partenza/arrivo del cavo sottomarino alla stazione di terra.

1. Introduzione



Figura 1.5

Bobina di spianamento in corrente continua nella centrale di conversione del SAPEI.



Figura 1.6

In alto la Giulio Verne, in basso il cavo del SAPEI adagiato sulla nave pronto per la posa in mare.



Riferendosi alle sole linee in cavo in DC installate si ha che la tipologia di cavo maggiormente utilizzata è quella in cui l'isolamento è costituito da carta impregnata con olio. Questo è infatti il primo tipo di isolamento associato ai sistemi in HVDC e, vista la buona affidabilità, la maggior parte dei cavi prodotti in passato sono tutt'ora in esercizio. Tuttavia questo tipo di isolamento è caratterizzato da una notevole complessità nel processo di produzione, ciò porta quindi ad avere anche dei costi elevati. Non per ultimo, a tali cavi, sono associati anche dei problemi di aspetto ambientale dovuti alla presenza dell'olio.

Le prospettive di sviluppo e diffusione dei sistemi e, in particolare, dei cavi per la trasmissione di energia in corrente continua hanno fortemente accresciuto l'interesse delle aziende produttrici verso il miglioramento di questo tipo di prodotto. In particolare negli ultimi anni sono stati impiegati notevoli investimenti nello studio di fattibilità di cavi HVDC con isolamento polimerico estruso, mutuando le conoscenze dei cavi AC dove tale isolamento è ormai una tecnologia consolidata anche per cavi ad altissima tensione (400-500 kV). Tale soluzione, infatti, presenta notevoli vantaggi legati sia alla semplificazione costruttiva sia alle superiori caratteristiche elettriche e chimiche rispetto ai tradizionali sistemi di isolamento in carta ed olio:

- I materiali polimerici possono essere utilizzati a temperature del conduttore più alte rispetto ai corrispettivi in carta ed olio; questo perché le variazioni termiche possono portare a moti dell'olio, provocando delle discontinuità nell'isolamento con conseguenze ovvie. Se un cavo in olio ha la temperatura di funzionamento attorno ai 55°C il corrispettivo in Polietilene Reticolato (XLPE) può arrivare fino a 90°C.
- I cavi estrusi risultano più leggeri
- Per i cavi estrusi è più semplice il montaggio dei giunti
- I cavi prodotti con materiali polimerici necessitano di una manutenzione molto minore

Tra i materiali polimerici, quello che sembrava avere le migliori caratteristiche per sostituire validamente l'isolamento con carta e olio è stato il polietilene (PE). Tale materiale, infatti, è facilmente reperibile, è sufficientemente puro ed uniforme e presenta una rigidità dielettrica elevata (circa 800kV/mm in DC). Inoltre, se paragonato alla carta impregnata con olio, presenta una minore permittività relativa, una minore resistività termica e buone caratteristiche fisico-chimiche a contatto con un'ampia gamma di elementi [4].

1. Introduzione

Nella Tabella 1 sono confrontate le proprietà di alcuni materiali isolanti polimerici, che sono stati considerati per la produzione di cavi HVDC, con quelle della carta ed olio.

Tabella 1. Confronto fra i materiali isolanti più utilizzati per cavi in DC

Materiale	Carta Impregnata	PVC	EPR	PE	XLPE
Densità (kg/m³)	1250	1400	1200	900	900
Permittività Relativa	3.5	8	3.3	2.3	2.5
Perdite Dielettriche (tanδ*10⁻⁴)	20	1000	40	4	4
Resistività Termica (°Cm/W)	5.0 – 6.0	6.0	5.0	3	3.5

Nei primi anni '70 sono stati prodotti i primi cavi con isolante estruso, ma fino alla fine del millennio i test su di essi sono stati insoddisfacenti. Inizialmente si usarono polimeri termoplastici come PE e XLPE, che però fallirono per via di un invecchiamento precoce. Questo portò ad un ulteriore investimento da parte delle R&D sullo studio di questi materiali e sulla comprensione dei processi di degradazione che si creano in presenza di campi elettrici continui. Nuovi metodi sperimentali hanno portato alla comprensione della distribuzione del campo in DC e alla fine del millennio è stato possibile realizzare i primi cavi estrusi per le applicazioni in HVDC.

Da allora sono stati fatti numerosi passi avanti in questo campo, ad oggi vi sono cavi per la HVDC qualificati fino a 640 kV.



Il seguente capitolo dà una breve descrizione sui sistemi elettrici per il trasporto dell'energia focalizzandosi sui sistemi HVDC. Verrà inoltre data un'immagine sull'evoluzione storica di questi sistemi e sulle loro caratteristiche economiche e tecniche.

CARATTERISTICHE DEL CAMPO ELETTRICO IN DC

Capitolo 2

2. CARATTERISTICHE DEL CAMPO ELETTRICO IN DC

La necessità di studiare in maniera separata l'alta tensione in AC e in DC è giustificata da due sostanziali differenze:

- a) La DC non si presenta in natura e se si presenta è in casi estremamente rari.
- b) I fenomeni fisici, come le configurazioni del campo e i meccanismi di perforazione differiscono notevolmente da quelli in AC.

La DC viene costantemente accesa e spenta. Durante queste manovre il dielettrico viene stressato in maniera alternata e si hanno delle conseguenze nella distribuzione di campo e sui meccanismi di degradazione che portano alla perforazione. Inoltre ci vuole del tempo prima che il transitorio che porta al valore finale del campo sia estinto; questo lo si può vedere 2.1, dove la crescita delle cariche interne è mostrata in funzione del tempo. Solo dopo che questa crescita è saturata si stabilizza un campo DC puro.

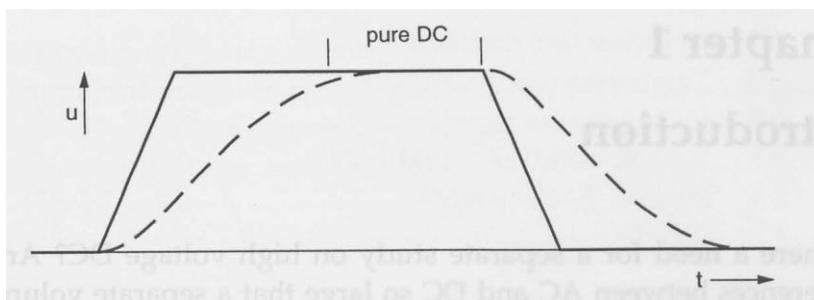


Figura 2.1

Accensione e spegnimento di una tensione continua. La linea tratteggiata rappresenta la crescita di cariche interne; solo se la crescita è stata saturata si ha un campo DC puro stabilito.

Per la AC vi sono solo due situazioni “presenza di tensione” e “assenza di tensione”. Per la DC i transitori danno vita a diverse situazioni.

- I. Differenza fra tensione positiva o negativa. Ci sono molte configurazioni in cui vi è una netta differenza tra i campi elettrici a tensione positiva o negativa; si prenda per esempio le scariche corona su di un filo: in tensione negativa si ha un repetition rate elevato, ma con magnitudo delle scariche ridotta, per valori di tensione positiva si ha invece l'opposto.

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC

- II. Inversione di polarità. Le cariche residue possono causare considerevoli aumenti o diminuzioni del valore del campo locale quando si inverte la polarità. Inoltre, l'inversione da + a - può dar vita a diversi effetti rispetto a quella da - a +.
- III. Applicare tensione per un periodo più breve o più lungo rispetto al tempo di saturazione T può risultare in importanti differenze nella distribuzione del campo. Inoltre lo spegnimento non determina istantaneamente l'annullamento dei campi elettrici, ci vuole tempo prima che tutte le cariche interne siano scomparse.
- IV. Sovrapposizione di sorgenti che commutano. In questo caso gli effetti di sorgenti che commutano si sovrappongono alla DC.
- V. Nei circuiti raddrizzatori si verificano situazioni in cui una tensione CA viene sovrapposta a una tensione CC. Il dielettrico viene quindi sollecitato con due diversi tipi di campi; entrambi devono essere analizzati.

Dai punti precedenti ne consegue che sia il design che i test fatti sugli apparati progettati sono fortemente influenzati dall'uso effettivo dell'oggetto stesso, quindi che sia continuo, intermittente, con o senza inversioni di polarità, ecc..

Le caratteristiche del campo in DC comportano delle conseguenze fisiche.

La distribuzione del campo elettrico differisce da quella a AC, la distribuzione del campo in applicazioni DC è determinata dalla conduttività specifica σ dei materiali, non dalla permittività ϵ e come per la AC. Qui le cariche di superficie e le cariche spaziali giocano un ruolo importante, il risultato è una distribuzione di carica dipendente dal tempo.

Le scariche parziali si comportano in modo diverso rispetto alla tensione continua e hanno un effetto diverso sull'invecchiamento e il guasto.

Al contrario di AC, le perdite dielettriche e la loro misurazione (misurazione $\text{tg}\delta$) non hanno significato qui. Queste misure potrebbero essere sostituite da misurazioni di correnti di dispersione.

I meccanismi di perforazione nelle applicazioni per corrente continua differiscono da quelli a corrente alternata. Ad esempio, si può notare che la perforazione termica è improbabile.

Lo sviluppo dei cavi estrusi per le applicazioni in HVDC è stato però lungo e complesso in quanto, inizialmente, non si riusciva a capire il perché i materiali subissero un invecchiamento più rapido rispetto ai materiali convenzionali (carta ed olio). Le ricerche svolte hanno dimostrato che tale fenomeno è da attribuirsi alla deformazione nell'andamento del campo elettrico che origina zone ad elevata sollecitazione (elevata concentrazione di campo elettrico) in cui l'invecchiamento procede più

rapidamente rispetto a quanto previsto dalla distribuzione teorica del campo, con una significativa riduzione della vita dell'isolante.

Le motivazioni addotte per spiegare tale deformazione del campo sono principalmente due:

- il fenomeno dell'inversione di campo elettrico;
- l'accumulo di carica spaziale.

Soprattutto quest'ultimo aspetto è imputato come la principale causa del fallimento dei materiali polimerici nei cavi HVDC. Gli studi svolti sembrano, infatti, evidenziare il ruolo prevalente giocato dalle cariche spaziali nel determinare il comportamento di tali materiali nei confronti del campo elettrico.

2.1 Il Fenomeno dell'Inversione di Campo Elettrico

Quando si calcola il campo in DC vi sono due variabili fondamentali da tenere in conto: temperatura e entità del campo. Nel caso della AC la ϵ del materiale, quindi il campo elettrico, non sono dipendenti dalla temperatura o dall'entità del campo stesso. In DC la conduttività σ è estremamente dipendente dalla temperatura e dal modulo del campo elettrico, questo porta ad avere un'ulteriore complessità nella trattazione dei campi in DC.

Un tipico esempio di questa complicazione lo si vede nei cavi sottomarini isolati in carta e olio. A pieno carico il cavo sarà ad una temperatura di circa 40 °C, mentre lo schermo sarà ad una temperatura di circa 10 °C; questo fa sì che il conduttore sia sottoposto ad un gradiente di temperatura. In Figura 2.2 è mostrato come varia la resistività dei due materiali in funzione della temperatura.

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC

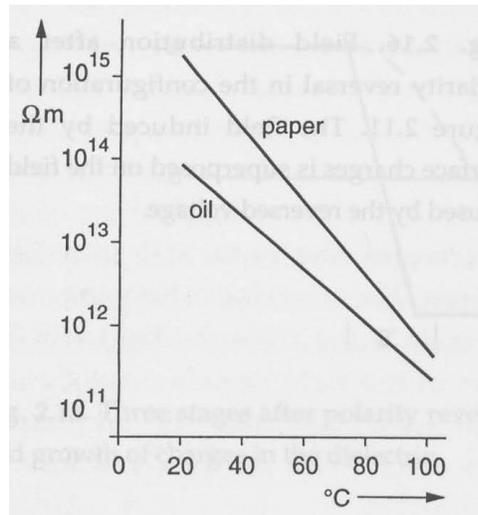


Figura 2.2

Resistività specifica dell'olio e della carta impregnata in funzione della temperatura.

Basandosi sulle curve riportate si deduce che la resistività vicino al conduttore sarà molto più piccola rispetto a quella vicina allo schermo. Di conseguenza il campo elettrico sarà molto più basso vicino al conduttore piuttosto che vicino allo schermo, in contrasto con la ben nota distribuzione del campo nei cavi AC dove è la massima intensità di campo a trovarsi vicino al conduttore. Nella Figura 2.3, viene mostrata l'intensità di campo in funzione della distanza dal conduttore (curva A). Però la conduttività dipende anche dall'intensità del campo in modo che nelle aree con un alto valore di campo diminuisce di conseguenza la resistività. Quindi, il campo è distribuito in modo più uniforme (curva B). In un cavo freddo, senza un gradiente di temperatura, la distribuzione del campo sarebbe stato rappresentata da una curva (curva C) del tutto analoga al caso dai cavi CA.

Al variare della temperatura nel dielettrico varia anche il rapporto ϵ/σ e quindi si genera una distribuzione di carica ρ proporzionale a $grad(\epsilon/\sigma)$. Questa carica spaziale è la causa della disuguaglianza fra le curve di campo C e B. Si può quindi concludere che il campo indotto dalla carica spaziale è uguale alla differenza tra le curve C e B, rappresentata dalla curva D in Figura 2.3. In questo caso la tensione sul cavo è invertita, viene quindi generato un campo nella direzione opposta. Questo campo è sovrapposto alla carica indotta il cui campo è rappresentato da D, quindi una forza di campo elevata viene generata al conduttore, rappresentata dalla curva E. Questa è la ragione per cui le inversioni di polarità in un cavo caldo sono una situazione critica per i cavi HVDC. Per questo motivo nei Type Test sui cavi HVDC è sempre richiesta l'inversione di polarità a pieno carico.

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC

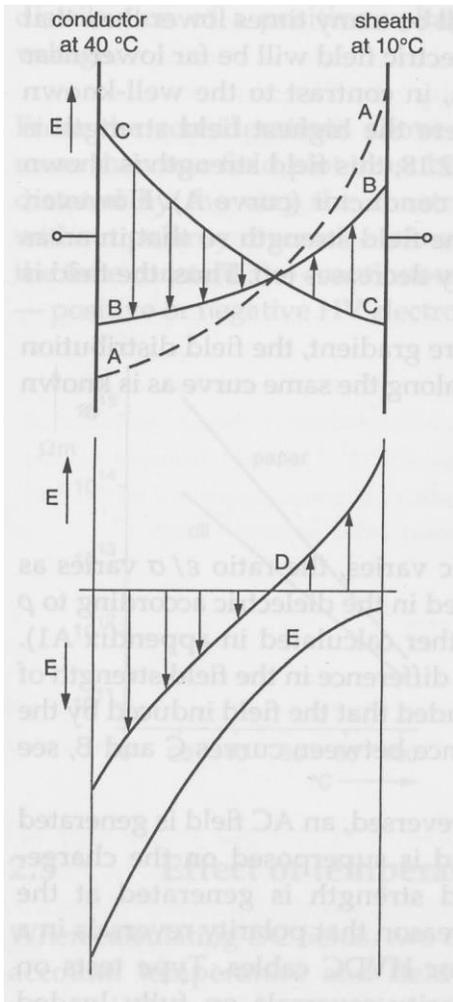


Figura 2.3

Distribuzione di carica in cavi con isolamento in carta e olio sottoposti ad un gradiente di temperatura.

Curva A: tendenza a concentrare il campo nella parte esterna più resistente (più fredda).

Curva B: forza effettiva del campo, alleviata dalla non linearità del dielettrico.

Curva C: distribuzione capacitiva.

Curva D: la differenza tra la curva B e la C è la carica che induce il campo D.

Curva E: il campo all'inversione di polarità è composto dalla carica del campo indotto e dal campo capacitivo.

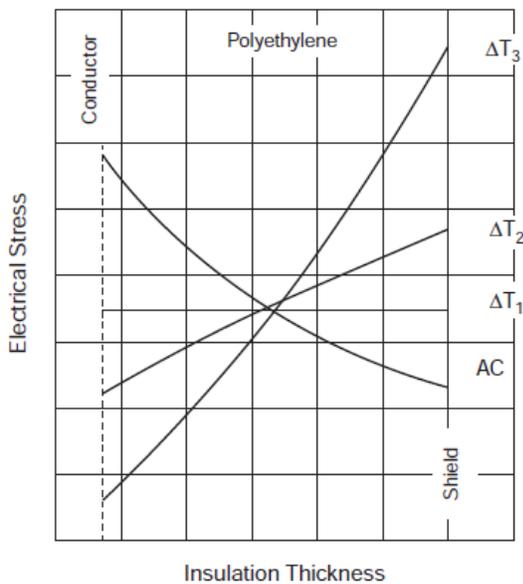


Figura 2.4

Il fenomeno dell'inversione del campo in un cavo DC isolato con PE al variare del gradiente di temperatura ($\Delta T_1 < \Delta T_2 < \Delta T_3$).

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC

La dimostrazione della formazione di carica spaziale dovuta alla presenza di un gradiente termico viene fatta partendo dalle equazioni di Maxwell e dalle equazioni di legame materiale. (In maiuscolo sono indicate le grandezze vettoriali mentre in minuscolo quelle scalari)

$$\begin{array}{l|l}
 \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\varepsilon} & \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\
 \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 & \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \\
 \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\
 \nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} & \varepsilon = \text{cost} \\
 & \sigma = \sigma_0 e^{(\alpha T + \beta E)}
 \end{array}$$

Si parte dall'equazione di Gauss e si mette in evidenza il contributo di σ :

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\varepsilon} \Rightarrow \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{J}}{\sigma} \right) = \frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

La costante dielettrica è uno scalare, può essere quindi portata all'interno della parentesi in modo da mettere in evidenza il rapporto ε/σ :

$$\nabla \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \mathbf{J} \right) = \rho_v \quad (2.2)$$

Tramite le proprietà del gradiente si può sviluppare la parte fra parentesi considerando che σ non è costante ma varia in funzione della posizione all'interno del materiale in quanto $\sigma = f(T, \mathbf{E})$:

$$\rho_v = \nabla \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \mathbf{J} \right) = (\nabla \cdot \mathbf{J}) \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} + \frac{\mathbf{J}}{\varepsilon} \cdot (\nabla \cdot \sigma) \quad (2.3)$$

Dato che per Kirchhoff si ha $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, il primo termine si può eliminare; rimane quindi:

$$\rho_v = \frac{\mathbf{J}}{\varepsilon} \cdot (\nabla \cdot \sigma) \quad (2.4)$$

Si è verificato quindi che, ogni qual volta vi è un gradiente di temperatura o un gradiente di tensione, si produce anche una distribuzione di carica volumetrica.

2.2 *Il Fenomeno di Accumulo di Carica Spaziale*

Il concetto di carica spaziale indica, in generale, un accumulo di carica intrappolata all'interno del materiale ed è stato originariamente introdotto per distinguere tale carica da quella superficiale, l'unica presente in un isolante ideale. L'accumulo di cariche spaziali è un fenomeno caratteristico dei materiali polimerici sottoposti ad un elevato campo elettrico DC.

Partendo dalle equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo è stato dimostrato che si ha la formazione di carica spaziale quando la conducibilità dell'isolante varia da punto a punto (condizione sempre verificata in quanto tale grandezza dipende dalla temperatura e dal campo elettrico).

Nei primi anni settanta si era intuita la presenza di carica intrappolata in un polimero studiando l'effetto, sulla rigidità dielettrica all'impulso, di una pre-sollecitazione elettrica variandone la polarità. Successivamente sono state sviluppate diverse tecniche non distruttive per la determinazione della carica intrappolata in un isolante; esse hanno portato a numerose pubblicazioni nelle quali è spiegata la dipendenza del fenomeno di accumulo di carica dal campo applicato, dalla temperatura, dal tempo e dal materiale all'interfaccia col polimero.

L'effetto provocato dall'accumulo di carica spaziale è una distorsione del campo elettrico. Tale distorsione, che può essere in certi casi assai significativa, dà origine a zone estremamente sollecitate nelle quali il materiale invecchia precocemente con una conseguente considerevole riduzione della vita rispetto a quella prevedibile considerando il campo elettrico teorico.

Recenti teorie sul fenomeno dell'invecchiamento DC sembrano attribuire alla carica spaziale un'importanza ancora superiore rispetto a quella macroscopica appena descritta, assumendola come una delle cause scatenanti dei processi degradativi riconosciuti nei polimeri. Tali teorie, infatti, prevedono che l'influenza della carica spaziale non sia solo quella macroscopica di deformazione del campo ma che i centri di carica, essendo zone di accumulo energetico, influenzino radicalmente la cinetica chimica del materiale dando origine a reazioni irreversibili o comunque provocando una diminuzione della barriera di energia libera associata alle reazioni di degradazione. Secondo questa ipotesi, l'intrappolamento della carica origina delle concentrazioni locali di carica (più probabili nelle vicinanze di difetti del materiale) a cui si associano un'energia elettrostatica ed un'energia elettromeccanica anomale. L'effetto della carica intrappolata sarebbe allora quello di favorire o comunque accelerare, tramite questa energia, le reazioni di degradazione che portano alla formazione delle microcavità all'interno del materiale, dove possono svilupparsi poi i successivi processi degradativi macroscopici. In queste condizioni la presenza di una soglia elettrica, introdotta in molti modelli dell'invecchiamento,

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC

può così essere spiegata in base all'esistenza di un valore di campo al di sopra del quale l'energia elettrostatica e l'energia elettromeccanica accumulate nei centri di carica spaziale sono in grado di innescare un processo di degradazione che causa la formazione di microcavità nell'isolante. Tale soglia di campo elettrico diventa quindi un parametro decisivo per l'eventuale utilizzazione di un materiale polimerico.

È però possibile distinguere le distribuzioni non uniformi della carica all'interno materiale a seconda della causa scatenante. Sostanzialmente i gruppi sono due:

- Distribuzione dovuta al gradiente termico
- Distribuzione dovuta all'iniezione di carica da parte degli elettrodi

Come dimostrato nel paragrafo 2.1 ogni qual volta si ha un gradiente di temperatura si ha una variazione della conducibilità del materiale e, di conseguenza, una variazione di distribuzione di carica nell'isolante. Questa carica è già presente nel sistema, quello che succede è una sua ricollocazione nel volume.

Quello che attualmente viene studiato con più interesse è invece la deformazione del campo elettrico nell'isolante dovuta alla presenza di cariche iniettate dagli elettrodi. Queste infatti sono cariche esterne che permeano nel materiale e vanno ad agire localmente accelerando l'invecchiamento dell'isolante. In fase di progetto dei cavi è infatti importante valutare l'accoppiata semiconduttivo-isolante, ciò viene fatto per valutare quali sono quei materiali che accoppiati garantiscono un minor numero di cariche iniettate nell'isolante.

2.3 La ricerca

È ormai opinione comune che le caratteristiche di un materiale polimerico da impiegare per la costruzione dei moderni cavi HVDC debbano essere le seguenti:

- Conducibilità elettrica quanto più possibile indipendente dalla temperatura, dal campo elettrico, dall'inversione di polarità e dal tempo di sollecitazione.
- Bassa resistenza termica.
- Alta rigidità dielettrica, indipendente dalla temperatura e dalla inversione di polarità.
- Limitate quantità di carica accumulata sotto l'effetto di un campo elettrico.

I materiali fino ad ora provati per la costruzione di cavi HVDC possono essere raggruppati in due categorie: i materiali “puri” ed i materiali additivati. Questi ultimi possono essere ulteriormente divisi in materiali additivati al fine di modificarne le caratteristiche termiche e materiali additivati al fine di diminuirne l’accumulo di carica spaziale. I materiali polimerici “puri” studiati per l’utilizzazione nei cavi HVDC sono, principalmente, LDPE, XLPE e HDPE. Questi materiali sono stati provati in una ampia gamma di valori di temperatura e di campo elettrico, riscontrando una forte dipendenza della rigidità dielettrica dalla temperatura. Inoltre, i fenomeni di inversione di campo e di accumulo di carica sono la causa di una distorsione del campo elettrico non trascurabile. Per questi motivi, allo stato attuale, la costruzione di cavi HVDC con un isolante polimerico “puro” sembra improbabile. Gran parte degli sforzi e degli investimenti sono perciò concentrati sugli isolanti polimerici additivati ed in particolare sulla scelta degli additivi migliori.

Gli studi svolti al fine di determinare dei metodi per la limitazione del fenomeno d’inversione del campo in un polimero sottoposto a sollecitazione HVDC hanno dimostrato come risulti fondamentale diminuirne la resistività termica e limitare la dipendenza della conducibilità elettrica dalla temperatura. Seguendo tale impostazione sono stati ottenuti un certo numero di nuovi composti, additivando diversi polimeri (tra cui anche l’XLPE) con alcune sostanze inorganiche; questi composti hanno mostrato concreti miglioramenti ad alte temperature e ad alti campi elettrici, lasciando intravedere buone prospettive di applicazione. A tutt’oggi sono ancora in corso ricerche sull’accumulo di carica spaziale in questi composti.

Alcuni studi propongono di limitare l’accumulo di carica spaziale impedendo l’iniezione di elettroni dal catodo o “neutralizzando” quelli eventualmente iniettati, i ricercatori hanno tentato di progettare nuovi materiali. I metodi usati sono stati diversi:

- a) Cambiamento delle caratteristiche del contatto elettrodo-isolante.
- b) Cambiamento dei meccanismi di conduzione.
- c) Realizzazione di nuovi materiali compositi.

Come pubblicato da diversi autori, il contatto elettrodo-isolante ha un ruolo importante nel fenomeno di accumulo di carica spaziale. In particolare, la quantità di carica intrappolata dipende sia dal materiale polimerico, sia dal materiale elettrodico, sia dalla qualità del contatto. L’accumulo di carica in provini di LDPE, ad esempio, è minore nel caso si utilizzino elettrodi in alluminio piuttosto che in oro (Figura 2.5).

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC

L'accumulo di carica può essere limitato modificando alcune caratteristiche del materiale: riducendo, ad esempio, il potenziale di estrazione e l'affinità elettronica, diminuendo la profondità ed il numero delle trappole, aumentando il libero cammino medio dei portatori, oppure neutralizzando le cariche iniettate. In letteratura sono presenti molte ricerche nelle quali si indaga il meccanismo dell'intrappolamento di carica in materiali polimerici additivati con diversi materiali organici o inorganici. Da queste si evince che al variare dell'additivo può accumularsi più o meno carica e che lo stesso additivo fornisce risultati diversi a seconda del polimero usato.

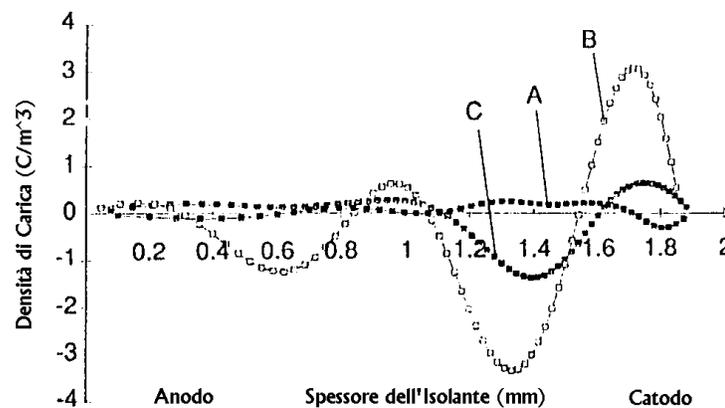


Figura 2.5

Andamento della carica accumulata: A) LDPE additivato con titanato di bario ($BaTiO_3$), elettrodi in oro. B) LDPE puro, elettrodi in oro. C) LDPE puro, elettrodi in alluminio.

Si deve comunque ricordare che, modificando la struttura del materiale, possono cambiare anche altre sue proprietà come, ad esempio, la rigidità dielettrica, le caratteristiche di vita ed il coefficiente termico. Quindi un materiale additivato deve essere nuovamente provato, ricordando che l'accumulo di carica è solo uno dei parametri che è interessante conoscere.

Nella Figura 2.5 è riportato, come esempio, l'andamento della carica intrappolata nell'LDPE al variare della metallizzazione (oro e alluminio) e dell'additivo (materiale puro e additivato con titanato di bario). Date le innumerevoli variabili in gioco quando si prendono in considerazione materiali additivati, risulta fondamentale l'utilizzo di tecniche di indagine rapide in grado di fornire informazioni sul comportamento del materiale. In questo modo, infatti, si possono vagliare molte più soluzioni possibili senza dover perdere molto tempo su ognuna di esse.

È importante notare che la modifica della struttura, piuttosto che il drogaggio, dei materiali isolanti può portare ad avere un elemento più performante se lo si valuta riferito alla problematica delle cariche

iniettate, tuttavia non è detto che mantenga le stesse caratteristiche dielettriche, quindi si avrebbe un peggioramento della sua funzione principale. Per questo motivo la ricerca sta spingendo per trovare dei materiali che possano soddisfare al contempo entrambe le richieste.

2. Caratteristiche del campo elettrico in DC



MATERIALI POLIMERICI E LA FORMAZIONE DI CARICA DI SPAZIO

Capitolo 3

Il seguente capitolo descriverà la struttura molecolare dei materiali polimerici più utilizzati per la produzione degli isolanti per cavi estrusi, evidenziandone le principali caratteristiche elettriche. Verranno inoltre trattati i processi che portano all'accumulo di carica spaziale.

3. I MATERIALI POLIMERICI E LA FORMAZIONE DI CARICA DI SPAZIO

Quando si parla di carica spaziale nei solidi bisogna fare una distinzione fra materiali omogenei, come i polimeri, e materiali disomogenei, come la carta e olio. Di seguito si andranno a fare valutazioni sui materiali omogenei, in quanto la produzione di cavi per applicazioni HVDC sta via via rimpiazzando i cavi in carta e olio con cavi estrusi, dove lo strato isolante è costituito da materiali polimerici.

Per lo studio della generazione di carica spaziale nei polimeri sono importanti tre fenomeni:

- *Conduzione*, come il movimento delle cariche nel dielettrico
- *Iniezione*, cioè l'emissione o l'estrazione delle cariche dagli elettrodi
- *Intrappolamento*, quindi l'ancoraggio dei portatori di carica nelle catene polimeriche

Questi meccanismi sono noti dalla fisica dello stato solido e dalla ricerca sui cristalli. Sebbene i polimeri non siano cristallini in questo senso, le nozioni di fisica dello stato solido possono essere utilizzate per la descrizione dei fenomeni in essi. È quindi necessario uno studio della struttura molecolare di un polimero. Di seguito verranno studiati il *polietilene* (PE) e il *polietilene reticolato* (XLPE), che sono fra i polimeri più usati.

3.1 I polimeri e la loro struttura

Un polimero è un composto organico costituito da macromolecole formate da catene di semplici unità molecolari (monomeri); queste ultime rappresentano l'elemento fondamentale che caratterizza il polimero. Le macromolecole sono sintetizzate mediante reazioni, dette di polimerizzazione, nelle quali l'azione di opportuni catalizzatori innesca la formazione dei legami covalenti fra i vari monomeri. Nella Figura 3.1 è riportata, come esempio, la polimerizzazione dell'etilene che genera il polietilene (PE), il più semplice polimero idrocarburico; esso è un tipico esempio di polimero sintetico.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

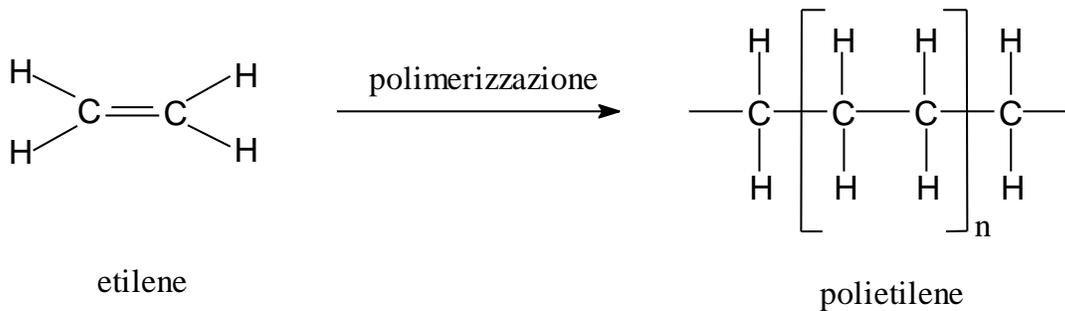


Figura 3.1

Schema della polimerizzazione dell'etilene a polietilene.

Il numero dei monomeri presenti nelle catene macromolecolari è variabile (nel PE esso può variare da qualche migliaio a qualche milione), il suo valore medio rappresenta il grado di polimerizzazione del composto. Come conseguenza di questo fatto anche il peso molecolare di un polimero non ha un valore definito e viene assunto pari alla media pesata dei pesi molecolari delle diverse catene idrocarburiche. I materiali polimerici sono noti, in generale, per la loro bassa densità (compresa fra 0.9 e 1.5 g/cm³, ovvero da 5 a 8 volte inferiore a quella delle leghe leggere) e per il loro uso come isolanti termici ed elettrici. I polimeri riflettono scarsamente la luce e, anzi, tendono ad essere trasparenti o traslucidi.

3.1.1 Tipi di polimeri

I polimeri possono essere classificati sulla base di diverse proprietà, come ad esempio il tipo di sintesi da cui derivano, il comportamento nei confronti della temperatura e la morfologia delle catene. La classificazione dei polimeri secondo il tipo di sintesi discende dal fatto che le molecole a lunga catena sono prodotte da due tipi generali di reazioni: la polimerizzazione per addizione e quella per condensazione. Si parla di polimerizzazione per addizione quando uno o più tipi di monomeri insaturi (contenenti doppi legami C=C) si addizionano uno all'altro per formare una catena. Il più semplice esempio di questo tipo di polimerizzazione è ancora costituito dalla sintesi del polietilene (Figura 3.1). Queste catene si dispongono in parte parallele a sé stesse o ad altre catene, vedi Figura 3.2. Queste regioni parallele formano la parte cristallina del polimero. Per un'altra parte della loro lunghezza, le catene seguono un percorso arbitrario e creano regioni amorfe. In queste regioni amorfe si accumulano additivi come impurità e antiossidanti, proprio queste regioni sono fondamentali per lo studio dell'accumulo di carica di spazio. Si parla di polimerizzazione per condensazione quando ad ogni passaggio della formazione della catena macromolecolare viene anche prodotta una piccola molecola

(tipicamente acqua). Non sono in questo caso necessarie unità monomeriche con doppi legami C=C, ma contenenti gruppi funzionali amminici e carbossilici adatti a condensare tra loro.

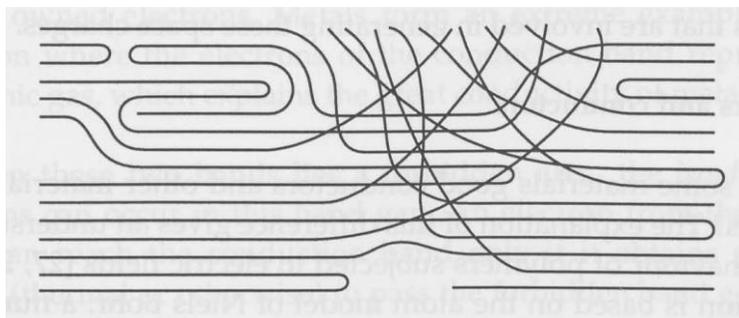


Figura 3.2

Struttura del polietilene. In figura sono messe in evidenza le zone cristalline e le zone amorfe del polimero

Nei polimeri a configurazione lineare gli atomi lungo la catena sono collegati da legami primari, mentre tra catena e catena si stabiliscono legami di Van der Waals. I polimeri con questa struttura, detti termoplastici, rammolliscono all'aumentare della temperatura, si deformano facilmente e col raffreddamento riacquistano le loro proprietà originarie mantenendo la forma che è stata loro impartita.

Se sono invece presenti reticolazioni covalenti o forti legami idrogeno tra le molecole, un aumento della temperatura non produce la deformazione plastica. Tali polimeri sono detti termoindurenti e mantengono una certa resistenza fino a che non cominciano a decomporsi chimicamente.

A seconda del loro comportamento nei confronti della temperatura i polimeri vengono quindi classificati in termoplastici e termoindurenti; i primi subiscono una vera e propria fusione ad un certo valore di temperatura. Se il polimero ha un alto grado di cristallinità esiste un intervallo di temperature in cui avviene la fusione; se è amorfo è invece caratterizzato da una temperatura di transizione vetrosa. Quest'ultima rappresenta la temperatura al di sotto della quale le catene sono relativamente immobili ed il materiale, duro e fragile, presenta le proprietà del vetro. I materiali termoindurenti, invece, si degradano con la temperatura ma non fondono se non in parte.

Oltre ai legami fra i vari monomeri delle catene, i polimeri possono avere legami che uniscono catene vicine. Tali legami possono formarsi fra due macromolecole adiacenti, oppure il collegamento può avvenire attraverso una terza molecola che forma un ponte fra le due catene; tali legami sono detti *cross-links*.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

Nonostante i legami fra le catene non siano forti tanto quanto quelli intramolecolari, la loro presenza ha un importante effetto sui polimeri, ad esempio incrementando la resistenza alle sollecitazioni meccaniche

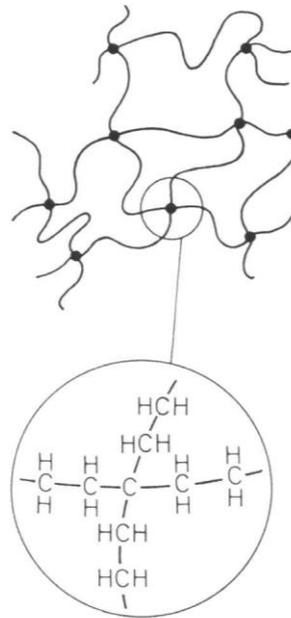


Figura 3.3

Rappresentazione di un polimero con legami laterali.

3.1.2 Cristallinità dei polimeri

I polimeri, analogamente agli altri solidi non cristallini, presentano un certo grado di ordine solo a breve raggio. In generale la morfologia dei polimeri è semicristallina, cioè essi sono costituiti da una miscela di zone cristalline immerse in zone amorfe. Le quantità relative di regioni cristalline e non cristalline nei polimeri variano con la composizione chimica, con le configurazioni molecolari e con i trattamenti subiti. In generale si definisce cristallinità di un polimero la percentuale di volume occupata dalle regioni cristalline. La cristallinità influenza molte caratteristiche del materiale, come ad esempio la densità. La densità delle regioni cristalline è più alta di quella delle regioni amorfe, per questo motivo la densità di un polimero aumenta con la sua cristallinità. Le prime e più semplici interpretazioni della natura semicristallina dei polimeri si basarono sui risultati di osservazioni eseguite mediante i raggi X. Tali osservazioni mostravano che le dimensioni delle cristalliti erano dell'ordine di 10^{-8} m, mentre la lunghezza delle macromolecole era molte volte superiore.

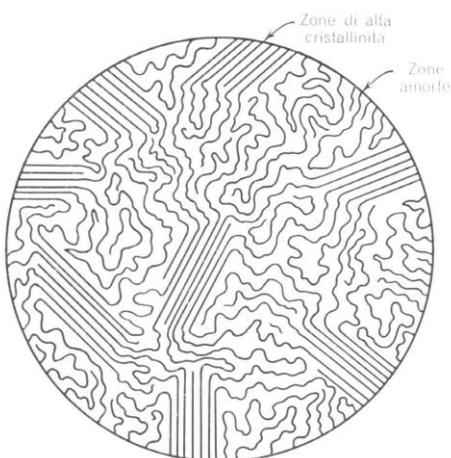


Figura 3.4

Struttura di un polimero semicristallino secondo il modello delle micelle a frange.

Le lamelle cristalline sono troppo piccole per essere visibili al microscopio ottico (nel PE hanno uno spessore medio di circa 10 nm). Quello che si osserva in un campione esteso di un polimero parzialmente cristallino per trasmissione di luce polarizzata è invece la presenza di una struttura formata da oggetti poliedrici, detta struttura sferulitica, come mostrato in Figura 3.5. Tali sferuliti consistono in aggregati di lamelle cristalline (Figura 3.6); a seconda del numero di lamelle contenute le sferuliti possono avere diverse dimensioni. Generalmente le dimensioni delle sferuliti sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce visibile. Questo spiega l'origine della colorazione bianco latte dei polimeri cristallini e la trasparenza dei polimeri amorfi; sono, infatti, le sferuliti a provocare la diffrazione della luce.

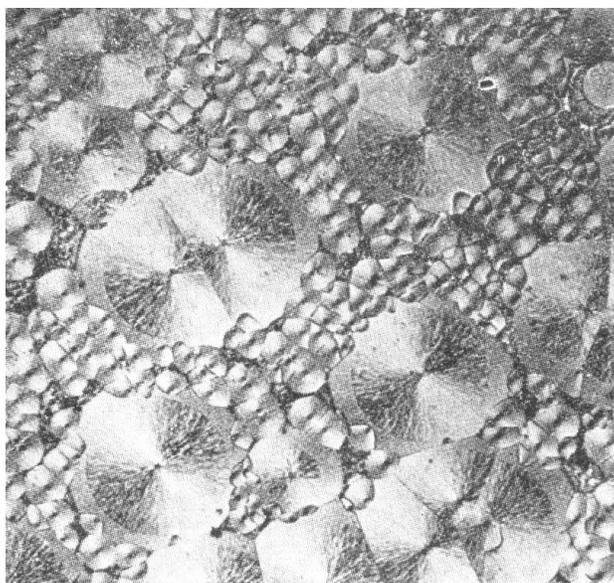


Figura 3.5

Struttura sferulitica di un polimero cristallino osservato a luce polarizzata.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

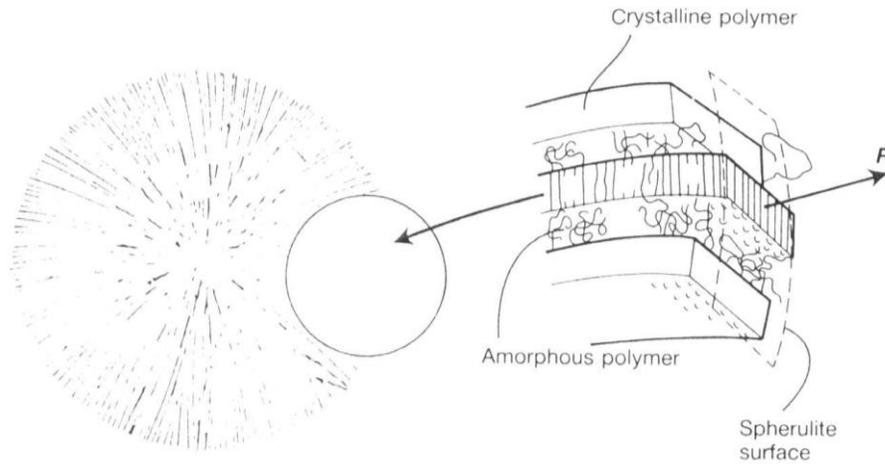


Figura 3.6

Illustrazione della struttura di una sferulite. Il vettore R indica la direzione di espansione.

3.1.3 Polietilene (PE) e Polietilene reticolato (XLPE)

La percentuale del volume che è occupato dalle regioni cristalline è chiamata cristallinità. La cristallinità influisce sulle caratteristiche del materiale, per esempio la densità. La densità delle regioni cristalline è, come ci si potrebbe aspettare dal denso impaccamento delle molecole, superiore a quella delle regioni amorse; nel polietilene si ha quindi un aumento con la cristallinità. Ciò ha influito sulla terminologia: il polietilene con circa il 55% di cristallinità è chiamato polietilene a bassa densità: LDPE. Il polietilene con cristallinità al 90% è chiamato polietilene ad alta densità: HDPE. Le differenze meccaniche sono grandi: HDPE è un materiale rigido, LDPE è flessibile e può essere utilizzato meglio per i cavi. Nella Tabella 3.1 sono messi a confronto LDPE e HDPE.

	LDPE	HDPE
Densità [g/cm ³]	0.92	0.95
Cristallinità	55%	90%
Modulo di Young	200-400	600-1500
Resistenza a trazione [MPa]	10-20	25-50
Trazione di rottura [MPa]	15-25	35-55
Deformazione alla frattura	400-700%	100-600%
Resistività elettrica [Ωm]	≈10 ¹⁵	>10 ¹⁸

Tabella 3.1

Le regioni amorfe conducono le cariche molto meglio di quelle cristalline, così che la resistività specifica del polietilene dipende in gran parte dalla cristallinità, come mostrato nella Tabella 3.1. Questo è importante per la generazione di carica spaziale e per le costanti di tempo che sono coinvolte nel processo di generazione di queste ultime.

Il polietilene reticolato (XLPE) è un polietilene tridimensionale con una struttura a rete generata dai ponti intermolecolari. Esso può essere ottenuto sia mediante irradiazione del polietilene sia mediante reazioni chimiche. La metodologia standard prevede l'ottenimento dell'XLPE a partire da polietilene a bassa densità con l'aiuto di perossidi (come il DCP, di- α cumyl peroxide) in condizioni di alta temperatura e alta pressione. In genere durante il processo di reticolazione vengono aggiunte anche basse concentrazioni di antiossidanti, al fine di limitare l'effetto degradante dell'ossidazione sul materiale. L'XLPE, pur mantenendo praticamente inalterate le buone caratteristiche del PE, presenta notevoli miglioramenti nei confronti della deformazione termica, dell'invecchiamento termico e delle rotture dovute alla sollecitazione ambientale.

3.2 La conducibilità e il modello a bande

Una caratteristica elettrica grazie alla quale si possono distinguere i materiali fra isolanti, semiconduttivi, conduttivi o superconduttivi è la conducibilità.

Fondamentalmente la conduzione elettrica consiste in un moto di cariche attraverso il materiale sotto l'azione di un campo elettrico o di un gradiente di temperatura. La corrente elettrica, i , è definita come la quantità di carica dQ che fluisce attraverso la superficie A nell'intervallo di tempo dt , cioè:

$$i = \frac{dQ}{dt} = nqvA \quad (3.1)$$

Dove n è il numero dei portatori di carica per unità di volume, q è la carica trasportata da ogni portatore e v è la loro velocità media.

La densità di corrente, J , ossia la corrente per unità di superficie, è allora essere definita come:

$$J = \frac{i}{A} = nqv \quad (3.2)$$

In presenza di un campo elettrico la velocità media v dei portatori di carica q è proporzionale al campo stesso:

$$v = \mu E \quad (3.3)$$

μ (m^2/s) è definita come mobilità media dei portatori di carica.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

Esplicitando la v nelle equazioni 3.1 e 3.2 si ottiene:

$$\mathbf{i} = nq\mu\mathbf{E}A \quad (3.4)$$

$$\mathbf{J} = nq\mu\mathbf{E} \quad (3.5)$$

La conducibilità elettrica σ è definita dalla relazione:

$$\sigma = \frac{\mathbf{J}}{\mathbf{E}} \quad (3.6)$$

Il reciproco della conducibilità rappresenta la resistività elettrica del materiale ρ .

Inserendo la 3.5 nella 3.6 si ha:

$$\sigma = \frac{nq\mu\mathbf{E}}{\mathbf{E}} = nq\mu \quad (3.7)$$

Fino ad ora si è implicitamente supposta la presenza di un solo portatore di carica, nella realtà possono però essercene diversi. Viene da sé che ogni specie di portatori ha una differenza di presenza in numero, così come nel valore di carica trasportata e di mobilità media. Perciò l'espressione della conducibilità in presenza di molteplici portatori di carica è data dalla sommatoria estesa a tutti i portatori:

$$\sigma = \sum_i n_i q_i \mu_i \quad (3.8)$$

Il numero e la mobilità dei portatori di carica, quindi la conducibilità, dipendono sia dal tipo di materiale sia da parametri sperimentali quali la tensione applicata, la temperatura e altre condizioni ambientali.

La spiegazione del perché alcuni materiali sono più o meno conduttivi rispetto ad altri è basata sul modello atomico di Niels Bohr: un numero di elettroni si muove in orbite separate attorno al nucleo di un atomo. Non tutte le orbite sono possibili; è infatti disponibile un numero limitato di orbite che si trovano a distanze discrete dal nucleo. Un elettrone può saltare da un'orbita all'altra, non può spostarsi in mezzo: ogni orbita rappresenta un livello di energia distinto. Le orbite disponibili sembrano concentrate nelle bande di energia in cui queste orbite si trovano vicine tra loro, vedi figura 3.7. Ci sono due importanti bande di energia: la banda di valenza e la banda di conduzione. Nella banda di valenza gli elettroni sono strettamente accoppiati all'atomo. Possono lasciare questa banda solo per mezzo di

processi chimici (Ad esempio due atomi di idrogeno perdono un elettrone ciascuno $H + e$ e $H + e$ e un atomo di ossigeno riceve questi elettroni O^{2-} nel qual caso si forma acqua).

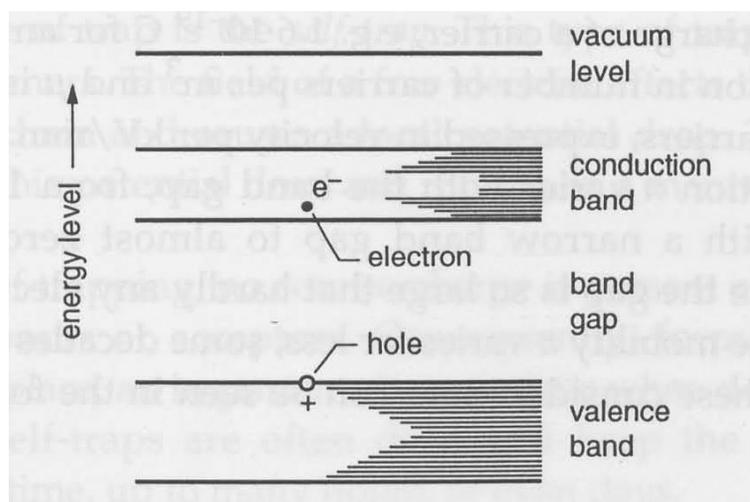


Figura 3.7

Rappresentazione schematizzata del modello a bande. La banda più in alto rappresenta la banda energetica occupata parzialmente o completamente dagli elettroni (detta banda di conduzione), quella in basso è detta banda di valenza ed infine la zona fra le due indica la differenza di energia fra valenza e conduzione ed è detta banda proibita.

La banda superiore nella figura 3.7 è la banda di conduzione. Gli elettroni in questa banda possono facilmente saltare da un atomo all'altro; sono, per così dire, elettroni posseduti congiuntamente. I metalli costituiscono un esempio estremo di questa situazione in cui gli elettroni della banda di conduzione possono essere rappresentati come un gas elettronico, il che spiega la grande conduttività dei metalli.

Tra queste due bande si trova un'area proibita, il *band gap*. Nessun elettrone può verificarsi in questo intervallo di banda. Un elettrone della banda di valenza può raggiungere la banda di conduzione solo se ottiene energia sufficiente (termica o meno) per superare il gap band proibito in un singolo salto. La stessa considerazione vale per le lacune.

La conduttività di un materiale dipende dalla dimensione del gap band. Se questo intervallo è grande è estremamente improbabile che un elettrone possa superare lo spazio e partecipare alla conduttività. La larghezza di questo intervallo è espressa in elettronvolt: il numero di volt necessario per far saltare un elettrone oltre il gap di banda.

Nei conduttori la banda di valenza e quella di conduzione si sovrappongono, in questo caso gli elettroni di muoversi perché vi sono stati vuoti nei quali si possono spostare. Se infine la banda di valenza non si sovrappone con la successiva banda vuota, nessun elettrone può rispondere ad un campo elettrico,

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

a meno che non possa attraversare l'intervallo d'energia proibita fra le bande. Se tale intervallo è di qualche eV occorrono campi elettrici molto elevati per far compiere il salto agli elettroni ed in questa situazione si ha un isolante. Se l'intervallo d'energia proibita è abbastanza piccolo anche il solo contributo dell'energia termica, ad alte temperature, può essere tale da far passare alcuni elettroni nella banda più alta vuota formando contemporaneamente degli stati vuoti nella banda di valenza. Tali materiali sono detti semiconduttori.

Le proprietà di conduzione sono, quindi, controllate dalla larghezza del salto energetico proibito, dalla disposizione delle bande permesse e dal loro riempimento elettronico.

			Concentrazione di elettroni per m ³	Resistività Ωm
CONDUCTOR	Banda stretta	<0.2 eV	da 10 ²⁷ a 10	da 10 ⁻⁷ a 10 ⁶
SEMICONDUTTORI	Banda limitata	da 0.2 a 2 eV	da 10 ¹¹ a 10 ²⁶	da 10 ⁻⁵ a 10 ¹⁰
INSULATOR	Banda larga	>2 eV	da 0 a 10 ¹⁰	da 10 ¹¹ a 10 ²⁰

Tabella 3.2

Le regioni cristalline del polietilene hanno, secondo la teoria, un valore di energia della banda proibita anche maggiore di quello degli isolanti puri; queste zone non contribuiscono quindi alla conduttività del polimero. La conduzione, nel caso, si verifica nelle regioni amorfe.

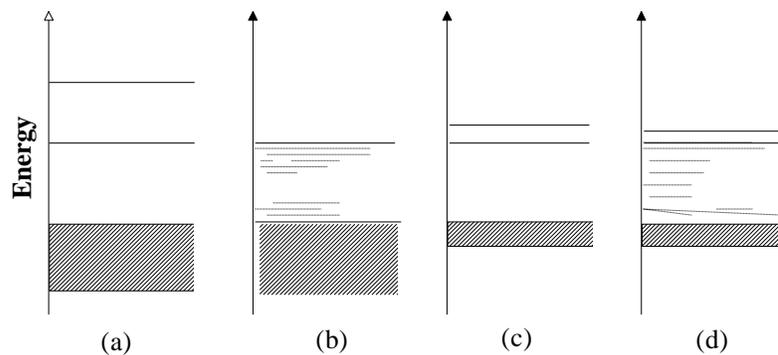


Figura 3.8

Evoluzione nelle bande d'energia nella transizione da materiali ordinati a materiali disordinati. (a) Cristallo covalente, (b) materiale covalente disordinato, (c) materiale molecolare ordinato, (d) materiale molecolare disordinato

3.3 Il moto delle cariche nei polimeri

Nelle regioni amorfe i difetti si verificano nella struttura cristallina, dove manca uno ione positivo o negativo. Questi difetti formano trappole per i portatori di carica. Una trappola per elettroni è chiamata *accettore*, una trappola per lacune è detta *donatore*; i portatori di carica rimangono lì per un lasso di tempo fino a quando non riprendono la conduzione. Il tempo che i portatori trascorrono nelle loro trappole dipende dalla profondità di queste trappole. La profondità di una trappola è definita come l'energia necessaria per liberare un portatore di carica. Se sono presenti molte trappole poco profonde ci si può aspettare una buona conduttività, più profonda è la trappola, minore è la conduttività.

Un altro tipo di trappola è l'auto-trappola. Si pensa che questo tipo di trappola si verifichi nei polimeri. Il campo di un elettrone libero influisce sulla struttura di una catena molecolare e causa di un calo di potenziale locale. L'elettrone è attratto da questa caduta di potenziale e, per così dire, si intrappola in sé stesso. In questo tipo di trappola non è presente alcuna carica opposta che bilanci il portatore intrappolato, così come nel caso di donatori o accettori. Di conseguenza si ha la formazione della carica spaziale, una caratteristica importante quando si ha a che fare con i campi DC. Le auto-trappole sono spesso profonde e trattengono le cariche per un tempo considerevole, fino a molte ore o addirittura giorni. Il verificarsi di queste trappole è correlato agli additivi nei polimeri, che tendono a concentrarsi nelle regioni amorfe. Questi additivi sono costituiti da antiossidanti che vengono aggiunti al materiale per contrastare i residui di invecchiamento termico, dei processi chimici durante la produzione e dalle impurità che non possono essere prevenute in alcun materiale. Piccole differenze negli additivi possono avere notevoli effetti sul numero di trappole, questo implica che la capacità di immagazzinare la carica spaziale è fortemente influenzata dal tipo e dalla concentrazione degli additivi.

Un diagramma appropriato per descrivere la “struttura energetica” dei polimeri è rappresentato in Figura 3.9. Tale figura mostra una cristallite uniforme, ma con alcuni difetti, circondata da regioni amorfe. Dentro le regioni amorfe si possono trovare stati energetici localizzati che non raggiungono l'estensione di una banda e che non hanno né profondità, né distribuzione uniformi. Gli stati localizzati profondi sono una proprietà intrinseca del polimero e sono direttamente in relazione con la sua struttura.

Da quanto detto risulta evidente come il fenomeno della conducibilità nei materiali polimerici non sia di facile trattazione e come esso non sia semplicemente riconducibile alla classica teoria delle bande energetiche. In questi materiali i portatori non possono passare se non con grande difficoltà da una catena all'altra e a questo fattore è legato ogni processo di conduzione su scala macroscopica.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

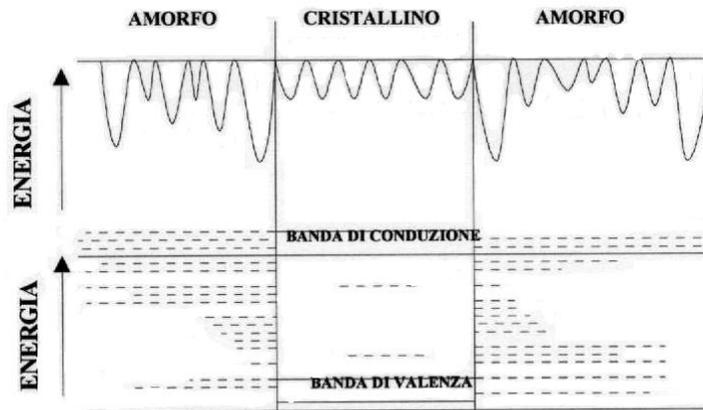


Figura 3.9

Diagramma energetico di un polimero. Le linee tratteggiate rappresentano gli stati energetici localizzati.

Per spiegare la conduzione delle parti amorfe delle catene molecolari è stata ideata la teoria del *hopping*. Ci sono molte aree nella catena dove un elettrone può essere intrappolato.

L'equazione che descrive la probabilità di hopping è:

$$p_n \propto e^{(-\Delta W)} e^{(-\gamma a)} \quad (3.9)$$

ΔW rappresenta la differenza di energia fra gli stati iniziale e finale, γ descrive il decadimento esponenziale della funzione d'onda con la distanza e a è la distanza media fra gli stati.

La barriera di potenziale tra due trappole è così alta che un elettrone non può oltrepassare questa barriera. Tuttavia, dal punto di vista della meccanica quantistica, la posizione di un elettrone può anche essere considerata come la probabilità che un elettrone si trovi sull'altro lato della barriera. Questa probabilità dipende dalla distanza tra le trappole. Poiché questa distanza è piccola, inferiore a 1 nm, la probabilità è diversa da zero, quindi a volte un elettrone può apparire sull'altro lato della barriera. Questo è chiamato *tunneling*, l'elettrone scava, per così dire, un tunnel attraverso la barriera potenziale.

La conduttività causata da questo processo è stata calcolata come:

$$\sigma = A e^{-\frac{B}{T^n}} \quad (3.10)$$

Dove A e B sono delle costanti, mentre $n=0.25$ e T è la temperatura.

La conduzione e l'emissione di cariche nel polietilene avvengono principalmente per via degli elettroni e non degli ioni. L'iniezione di elettroni al catodo e l'estrazione di elettroni all'anodo sono i principali meccanismi per l'emissione di cariche nel polietilene, questo vale anche per altri polimeri. Un

diverso gruppo di polimeri, tuttavia, emette e conduce "buchi". La trasmissione elettronica avviene in polietilene (PE), polietilene tereftalato (PET) e polietilene naftalene (PEN). Perché ci sia emissione di una carica, una barriera deve essere passata come mostrato nella figura 3.10. L'energia richiesta W per passare la barriera, secondo la figura è:

$$\text{Per gli elettroni: } W = \phi - \chi \quad (3.11)$$

$$\text{Per i buchi: } W = E_g - \phi + \chi, \quad (3.12)$$

Dove ϕ e χ sono le funzioni di lavoro per portare la carica al livello libero.

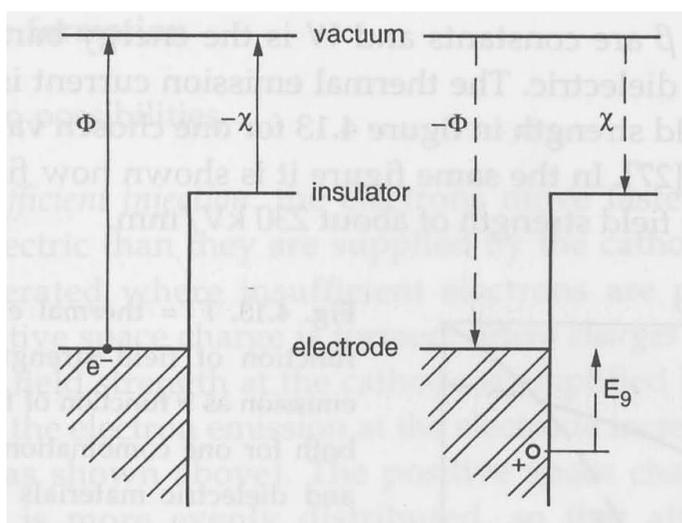


Figura 3.10

Barriera all'interfaccia tra elettrodo e dielettrico. Un elettrone deve passare una barriera $\phi - \chi$ per essere iniettato nel dielettrico, un buco deve superare una barriera $E_g - \phi + \chi$ per essere estratto.

È sempre più evidente come il fenomeno della conducibilità nei materiali polimerici non sia di facile trattazione e come non sia semplicemente riconducibile alla classica teoria delle bande energetiche. In questi materiali i portatori non possono passare se non con grande difficoltà da una catena all'altra, questo influisce sui processi di conduzione su scala macroscopica.

Dopo quanto detto si può concludere che il passaggio dei portatori può avvenire per salti discreti da un sito ad un altro sorpassando una barriera d'energia, i modi coi quali questo può avvenire sono rappresentati in Figura 3.11 e sono due:

- Il portatore può passare da uno stato all'altro per hopping, cioè sorpassando la barriera energetica che divide i suddetti stati
- Il portatore può attraversare la barriera energetica per effetto tunnel, senza dover superare la sommità

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

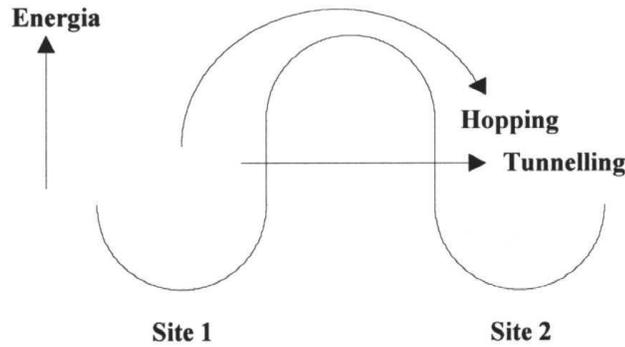


Figura 3.11

Trasferimento di portatori tra due stati adiacenti separati da una barriera di potenziale

In molti polimeri, però, la conduzione non è attribuibile al solo moto dei portatori di carica, bensì anche alla *conduzione ionica*. Questo processo può spiegare i comportamenti che hanno alcuni polimeri e che non seguono quanto previsto dalla legge di Ohm. In realtà i processi non ohmici potrebbero essere spiegati in vari modi, ciò non toglie che esistano polimeri in cui è evidente la presenza di una conduzione ionica (polimeri con ioni o con gruppi facilmente polarizzabili).

In un mezzo ad alta costante dielettrica ϵ si ha una riduzione delle forze coulombiane fra gli ioni, questo favorisce quindi la possibilità di una conduzione ionica. Quindi l'energia necessaria per dissociare un composto ionico è inversamente proporzionale a ϵ_r .

Considerando la reazione:



$$(1 - f_n)n_0 \Leftrightarrow f n_0 \quad f n_0$$

n_0 è la concentrazione del composto ionico, f è il suo grado di dissociazione. Ragionando sulle concentrazioni dei reagenti e dei prodotti si può definire una costante di equilibrio K :

$$K = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]} = \frac{f^2 n_0}{1 - f} \quad (3.14)$$

L'equilibrio può essere espresso in termini di energia necessaria per separare gli ioni in un mezzo ΔW :

$$K \propto K_0 e^{\left(\frac{-\Delta W}{\epsilon_s k T}\right)} \quad (3.15)$$

Considerando la presenza di una sola specie ionizzabile, dall'equazione 3.8 si ha che la conducibilità:

$$\sigma = f n_0 q (\mu_+ + \mu_-) \quad (3.16)$$

Dove μ rappresenta la mobilità degli ioni, + per quelli positivi e – per quelli negativi.

Se il grado di dissociazione è elevato, dalla 3.14 si ottiene che:

$$f \approx \sqrt{\frac{K}{n_0}} \quad (3.17)$$

Sostituendo la 3.17 nella 3.16 si ottiene:

$$\sigma = \sqrt{K n_0} q (\mu_+ + \mu_-) e^{\left(-\frac{\Delta W}{2\varepsilon_s k T}\right)} \quad (3.18)$$

La costante dielettrica del materiale compare all'esponente dell'equazione, il che significa una forte influenza di ε_s sul valore della conducibilità.

Nella realtà dei fatti, però, la conducibilità dei polimeri non rispecchia i calcoli teorici. Un altro effetto che può essere considerato per lo studio della conducibilità degli ioni è la viscosità del materiale. Supponendo un materiale con viscosità η , uno ione di raggio R che si muove a velocità v sarà sottoposto ad una forza resistente f_v . Tale ione è sottoposto ad una forza generata dal campo esterno f_E .

$$f_v = 6\pi\eta R v = 6\pi\eta R \mu E \quad (3.19)$$

$$f_E = qE \quad (3.20)$$

All'equilibrio le due forze si eguagliano. Inoltre dall'equazione 3.8 si può esplicitare μ e inserirlo nella 3.19. A questo punto ponendo l'uguaglianza fra f_v e f_E :

$$\sigma \eta = \frac{n q^2}{6\pi R} \quad (3.21)$$

È però stato osservato che vi sono frequenti deviazioni da questa regola, da questo si è capito che gli ioni sono fortemente influenzati dalla struttura locale del materiale.

Ad alti campi elettrici applicati la legge di Ohm non è più valida e la mobilità dipende dal campo elettrico stesso:

$$\mu = \mu_0 f(E) \quad (3.22)$$

Si suppone che il trasporto avvenga attraverso salti degli ioni da una posizione all'altra all'interno del polimero per via dell'azione del campo elettrico. La carica è q , la distanza media tra due posizioni è

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

a e lo ione, per passare da una posizione all'altra, deve superare una barriera di energia del valore U . Infine si ha ξ frequenza di fuga. Utilizzando tali parametri la mobilità è data dalla relazione:

$$\mu = \frac{2a\xi}{E} \sinh\left(\frac{qaE}{2kT}\right) e^{\left(-\frac{U}{kT}\right)} \quad (3.23)$$

Supponendo T costante e tenendo conto della 3.5, si ha che:

$$J \propto \sinh\left(\frac{qaE}{2kT}\right) \quad (3.24)$$

In base al valore del campo elettrico si può avere:

Bassi campi elettrici: $E \ll \frac{2kT}{qa}$ (3.25)

Alti campi elettrici: $E \gg \frac{2kT}{qa}$ (3.26)

Da tali considerazioni si può quindi esprimere la densità di corrente data dal moto degli ioni:

Dalla 3.25 si ha che $J \propto E$ (3.27)

Alti campi elettrici: $J \propto e^{\left(\frac{qaE}{2kT}\right)}$ (3.28)

Quindi si può dire che a bassi campi rimane valida la legge di Ohm, mentre ad alti valori del campo elettrico la conducibilità è esponenzialmente dipendente dal valore del campo stesso.

Il comportamento del moto degli ioni è descritto da equazioni simili a quelle che regolano la conduzione dei portatori di carica; per questo motivo è difficile stabilire quale meccanismo sta avvenendo all'interno di un polimero.

3.3.1 Iniezione della carica

L'*iniezione* di elettroni è principalmente causata dall'emissione di calore, ciò vale per un'intensità di campo fino a 200-300 kV/mm; al di sopra di tale range di valori avviene l'emissione per via del campo elettrico, ma in questo modo si è circa raggiunta la tensione di breakdown intrinseca. L'*estrazione* di

elettroni, o in altre parole l'iniezione di "buchi" è meno comprensibile dell'iniezione di elettroni. Test con aghi polarizzati positivamente con alti campi locali attorno ad essi hanno dimostrato che si verifica una distinta estrazione di elettroni, in modo da formare una carica spaziale positiva nelle vicinanze dell'ago.

L'emissione di elettroni (come detto sopra) avviene per effetto termico, ma questa emissione termica è addirittura facilitata applicando alte intensità di campo. La corrente di emissione i aumenta secondo Schottky con la forza del campo E e la temperatura T :

$$i = A T^2 e^{\left[\frac{-W + 0.5 \beta \sqrt{E}}{kT} \right]} \quad (3.27)$$

Dove A e β sono delle costanti e W è la barriera d'energia fra elettrodo e dielettrico.

La corrente di emissione termica in funzione del campo elettrico è mostrata in Figura 3.12, per un determinato valore di W e alla temperatura di 313K. Viene inoltre mostrato come oltre certi valori di campo (in questo caso circa 230 kV/mm), oltre all'emissione termica, il valore di corrente è influenzato anche dall'emissione per via del campo.

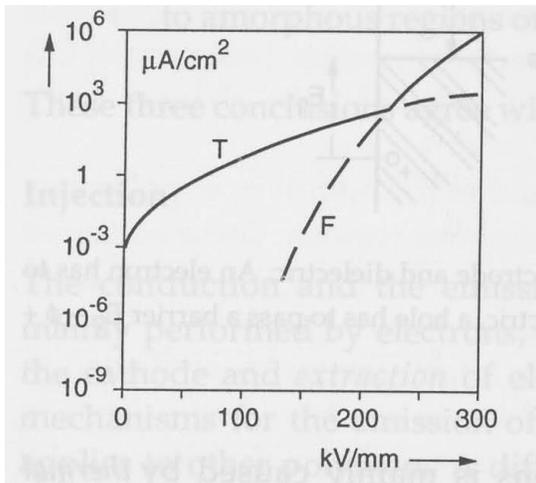


Figura 3.12

La linea T rappresenta l'emissione per effetto termico in funzione del campo elettrico. La linea F rappresenta l'emissione per effetto del campo elettrico in funzione del campo elettrico stesso. Entrambe sono riferite alla medesima configurazione di elettrodo e dielettrico alla temperatura di 313K.

È evidente come oltre i 320kV/mm entrambe gli effetti contribuiscono alla conduzione

Un terzo meccanismo di iniezione si presenta se esiste una cavità in cui si verificano scariche parziali. Un bombardamento di elettroni avviene su una delle interfacce. Questi elettroni possiedono energie da 20 a 25 eV e possono penetrare nel dielettrico per una profondità di 0.1 μm, in questo modo una notevole quantità di carica spaziale viene iniettata nel dielettrico. Test su modelli con cavità artificiali mostrano un sensibile aumento della polarizzazione. Nella figura 3.13 viene mostrata la corrente di polarizzazione di un modello con e senza cavità. In entrambi i casi la corrente si è stabilizzata

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

dopo circa sei ore, ma la corrente di polarizzazione è fino a due volte più grande nel campione che presenta le cavità con le scariche.

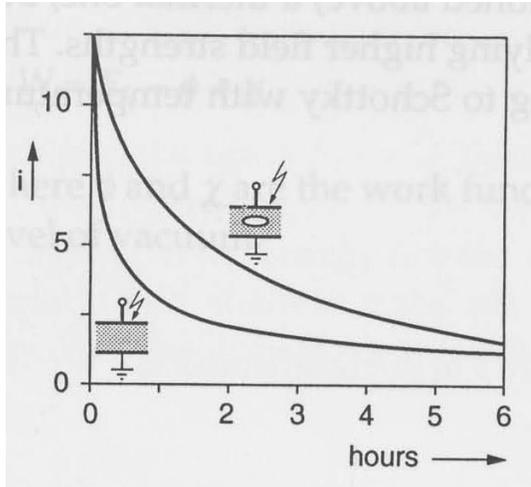


Figura 3.13

Corrente di polarizzazione per provini sottoposti ad un campo di 30 kV/mm DC per un campione di polietilene senza (curva inferiore) e con (curva superiore) cavità che presentano scariche.

3.3.2 Accumulo della carica

Con riferimento alla carica intrappolata nelle vicinanze degli elettrodi, possono essere osservati due tipi di carica spaziale: *omo carica* ed *etero carica*.

Quando l'iniezione è insufficiente gli elettroni si muovono più velocemente attraverso il dielettrico di quanto non siano stati spinti dal catodo. Viene generato uno strato in cui è insufficiente la presenza di elettroni e si forma una carica spaziale positiva: *etero carica* visibile in Figura 3.14. L'intensità di campo del catodo viene amplificata da questa carica e l'emissione di elettroni all'elettrodo aumenta (proporzionale a $e^{\sqrt{E}}$). La carica spaziale positiva diminuisce ed è distribuita in modo più uniforme, così che dopo un certo tempo si raggiunge un equilibrio.

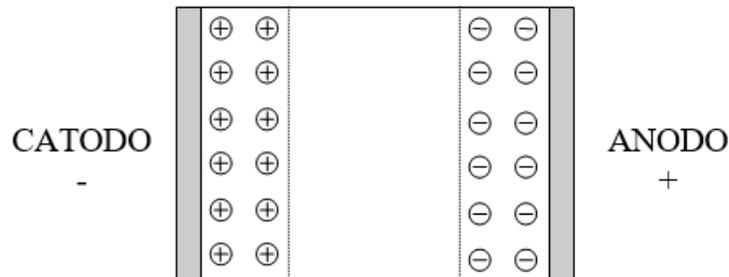


Figura 3.14

Campione con *etero carica*

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

Un processo simile si verifica nell'anodo con l'estrazione degli elettroni. Qui si formano sottili strati di etero cariche, vedi il lato destro della figura 3.14. Su entrambi i lati del dielettrico le cariche sono intrappolate nelle regioni amorfe del polimero. Se così non fosse, la carica svanirebbe presto dopo la rimozione della tensione e non rimarrebbe alcuna carica spaziale duratura nel tempo.

Il processo di generazione di etero carica in realtà non è unico, infatti, oltre alla spiegazione appena proposta, alcuni studi attribuiscono tale fenomeno alla ionizzazione delle specie dissociabili presenti. Quando viene applicato un campo elettrico, infatti, gli elettroni e gli ioni positivi generati dalla dissociazione migrano rispettivamente verso l'elettrodo di polarità opposta, qui vengono intrappolati.

Il discriminante che porta ad avere il primo effetto piuttosto che il secondo è dato dal tipo di materiale sottoposto al campo elettrico. In caso di materiali totalmente apolari (come ad esempio il polietilene reticolato) è alquanto improbabile che la formazione di etero carica sia data dalla dissociazione di specie polari, data la loro assenza. Ragionando per assurdo: se in questo tipo di materiale si avesse la dissociazione vorrebbe dire che i portatori di carica vengono strappati dalle catene polimeriche, dato che i legami di queste catene sono legami carbonio, tale effetto vorrebbe dire la dissociazione delle catene e quindi la scarica del materiale. Se invece si pensasse al polietilene la situazione cambierebbe, infatti tale materiale presenta delle impurezze come minerali al suo interno. In questo caso l'azione del campo elettrico esterno potrebbe portare le specie polari a dissociarsi ottenendo così il fenomeno di accumulo di etero carica nell'intorno degli elettrodi.

L'effetto della generazione di etero carica è un'intensificazione del campo vicino agli elettrodi e una conseguente sua riduzione nel centro del provino.

Nel caso in cui vi sia una iniezione eccessiva nel dielettrico si accumula un numero di elettroni maggiore di quelli che possono essere portati via. Viene così generata una carica spaziale che ha la stessa polarità del catodo: una omo carica come mostrato nella Figura 3.15. L'omo carica ha lo stesso segno dell'elettrodo vicino al quale si accumula ed è generalmente dovuta all'intrappolamento delle cariche iniettate. La distribuzione risultante della carica riduce la sollecitazione elettrica locale nelle vicinanze dell'elettrodo, ma rende più intenso il campo nella parte interna del provino.

Un processo simile può aver luogo anche sull'anodo.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

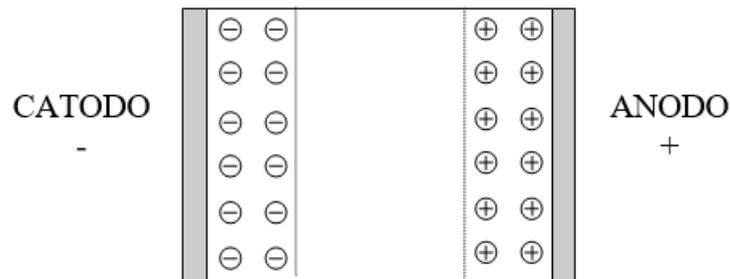


Figura 3.15
Campione con omo carica

Dovrebbe essere enfatizzato, tuttavia, che le omo o le etero cariche non sorgano necessariamente in entrambi gli elettrodi contemporaneamente. In entrambe gli elettrodi può verificarsi nessuna carica, oppure può verificarsi una carica simile a quella che si verifica all'elettrodo opposto.

3.3.3 L'effetto del campo elettrico nei processi di conduzione

Come già detto la maggior parte dei materiali polimerici è caratterizzata da un notevole grado di disordine. In queste condizioni, il concetto di bande energetiche non è più utilizzabile coerentemente e si utilizza il concetto fondamentale di stato energetico localizzato). Sono gli stati localizzati che determinano la conducibilità del polimero e dominano il processo di trasporto che, infatti, è caratterizzato da un susseguirsi di salti da uno stato localizzato ad un altro.

I portatori di carica che si muovono attraverso un polimero incontrano, proprio a causa del disordine che caratterizza il materiale, una fluttuazione spaziale della densità locale del materiale e dell'orientazione dei gruppi laterali delle catene. Si ottiene quindi una dispersione del gruppo dei portatori di carica dovuta ad una diversa distribuzione dei tempi di salto e dei tempi di attesa, tale gruppo inizialmente era compatto in movimento da un elettrodo verso quello opposto; nei materiali polimerici alcuni portatori arrivano all'elettrodo prima della media mentre altri dopo. Questo fatto si riflette sull'andamento delle caratteristiche corrente di conduzione-tempo (ottenute sottoponendo il polimero ad un campo elettrico continuo e costante), le quali presentano una lunga coda.

Considerando un pacchetto di portatori iniettati da un elettrodo, per quanto detto, quando i portatori più rapidi del gruppo raggiungono l'elettrodo opposto, la corrente transitoria si ridurrà in modo da assecondare la dispersione spaziale in cui si trovano i portatori di carica.

Conduzione a bassi campi

Per valori bassi di campo elettrico i meccanismi sopra descritti possono essere approssimati con leggi lineari. In questo caso la legge di Ohm descrive la dipendenza della corrente dalla tensione applicata, o ancora meglio, descrive la dipendenza della densità di corrente dal campo elettrico; inoltre la conducibilità σ non dipende, se non in maniera trascurabile, dal campo elettrico.

La dipendenza lineare fra corrente di conduzione e può essere giustificata dal fatto che ogni carica iniettata attraversa il materiale isolante giungendo all'elettrodo opposto senza generare un accumulo di carica nel materiale. Se invece dovesse prevalere l'iniezione di cariche dagli elettrodi rispetto al trasporto, si può considerare che per ogni carica iniettata ad un elettrodo ne venga estratta una all'elettrodo opposto, questa simmetria avviene nonostante non si manifesti il trasporto della carica fra i due elettrodi. In questo secondo caso, però, non si giunge ad una condizione di regime in quanto l'accumulo costante di omo carica nelle vicinanze degli elettrodi porta ad una diminuzione continua della corrente.

Queste riflessioni valgono però solo nel caso di conduzione elettronica. In molti casi è però di comune pensiero che nei polimeri, a bassi campi, prevalga la conduzione ionica, specialmente ad alte temperature. Anche in questo caso non è tuttavia errato considerare valida la legge di Ohm, infatti il legame fra J e E a bassi campi può essere considerato lineare in prima approssimazione.

Date tali caratteristiche si capisce che sperimentalmente è difficile stabilire se ci si trovi in presenza di conduzione elettronica piuttosto che ionica. Il metodo che si può utilizzare per capire quale meccanismo prevalga è quello di cambiare il materiale con cui sono fatti gli elettrodi; si passando da elettrodi metallici ad elettrodi semiconduttivi e si valuta la caratteristica $I(t)$, se questa rimane invariata significa che la conduzione è in prevalenza ionica, viceversa si è in presenza di una conduzione elettronica.

Conduzione ad alti campi

La densità di corrente è, nella realtà dei fatti, meglio descritta dalla legge di Child. Tale legge rappresenta la conduzione in un polimero senza trappole o con trappole sature. Il distacco dalla legge di Ohm è dato dal fatto che il polimero non è in grado di trasportare tutta la carica iniettata, quindi si ha che il numero di portatori di carica nell'unità di volume dipende dalla distanza dall'elettrodo. Col passare del tempo si forma una distribuzione di carica nell'intorno dell'elettrodo e si ha, come conseguenza, una variazione della distribuzione del campo.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

Legge di Child:

$$J = \frac{9}{8} \frac{\epsilon \mu V^2}{d^3} \quad (3.28)$$

Da questa legge vengono ricavate le equazioni che descrivono la distribuzione di carica e la distribuzione di campo in funzione della posizione nel dielettrico:

$$n(x) = 3\epsilon \frac{V}{4q\sqrt{d^3 x}} \quad (3.29)$$

$$E(x) = 3V \frac{\sqrt{x}}{2\sqrt{d^3}} \quad (3.30)$$

Questo spiega il fenomeno nel quale la carica di spazio limita le correnti (Space Charge Limited Currents SCLS).

Quanto introdotto è necessario per spiegare ciò che succede nei polimeri quando questi sono sottoposti a campi elettrici elevati. In tali condizioni sembra diventare predominante l'iniezione di carica dagli elettrodi, tuttavia, dopo un certo valore di campo, il meccanismo di trasporto (hopping) non può più trasferire da un elettrodo all'altro tutte le cariche. Quello che si crea è quindi un accumulo di omo carica nelle vicinanze dell'elettrodo, si ha quindi un'opposizione all'iniezione di nuove cariche dagli elettrodi. In condizioni di regime la densità di corrente è costante, il principio di conservazione della carica impone che una quantità Δq di carica non può essere iniettata da un elettrodo fino a quando un'uguale quantità di carica non sia stata trasportata e trasmessa all'elettrodo positivo. È quindi la formazione di omo carica che determina il processo di conduzione secondo la descrizione SCLC.

La carica che si forma nella vicinanza dell'elettrodo può essere intrappolata o liberata. Nel primo caso si ha una riduzione di corrente, questo perché si ha un aumento dell'energia necessaria per estrarre gli elettroni dalle trappole e trasferirli all'elettrodo positivo. Durante il transitorio si osservano però dei picchi di corrente che non sono spiegabili con la teoria SCLC, probabilmente perché tale descrizione utilizza ipotesi semplificative che danno solo una stima della mobilità dei portatori di carica. Nella conduzione a regime si ha che il meccanismo SCLC approssima meglio i dati sperimentali ottenuti, anche se non è così evidente la dipendenza della densità di corrente dallo spessore.

Generalmente la curva $I(t)$, ad alti campi, caratteristica del polietilene è spiegata considerando l'hopping delle cariche sia iniettate che detrappolate e utilizzando il concetto di trappole superficiali e

profonde per giustificare le anomalie che la curva ha al variare delle sollecitazioni esterne (campo e temperatura). Infatti gli elettroni nelle trappole superficiali hanno una minor inerzia e sono caratterizzati da un tempo di rilassamento minore rispetto a quello delle altre trappole. A regime si ha una dipendenza esponenziale della corrente da \sqrt{E} .

Tuttavia si è, finora, parlato del moto dei soli elettroni. Per alcuni materiali (Ad esempio: PVC, PE, PET) è però sensato pensare anche all'esistenza di una conduzione ionica. Questo fenomeno è stato confermato anche dai risultati sperimentali. Infatti sono stati osservati picchi di corrente durante la carica subito dopo l'inversione della polarità della tensione applicata; questo dato è spiegabile in termini di etero carica, tipica della conduzione ionica, accumulata di fronte agli elettrodi.

In letteratura si trovano vari esperimenti che mostrano l'esistenza di un processo di conduzione piuttosto che dell'altro. È poi stato visto, però, che i provini che mostravano la prevalenza di una conduzione elettronica erano preparati in maniera diversa da quelli con una prevalenza di conduzione ionica. Mentre i provini relativi al primo gruppo sono stati essiccati e temprati prima della misura, quelli relativi al secondo sono stati sottoposti ad una tensione continua a temperature elevate. Quest'ultimo tipo di trattamento ha originato nei provini una distribuzione di carica spaziale di tipo permanente. Ci si è trovati così di fronte a campioni strutturalmente diversi per i quali l'inizio del processo di conduzione ionico è impedito sopra i 100°C. Come conseguenza, il processo elettronico non è mascherato e sembra essere la diretta continuazione del fenomeno che ha luogo a temperature più basse, quasi da tutti considerato elettronico e limitato dagli elettrodi.

3.4 La rigidità elettrica e l'invecchiamento nei materiali

I materiali isolanti hanno la funzione di isolare le parti elettriche in tensione fra di loro, ma anche con l'ambiente circostante. Facendo una valutazione pratica, gli isolanti, sono l'elemento che rende possibile la realizzazione del circuito impedendo alle correnti di circolare all'interno del conduttore e non disperdersi verso terra.

Ogni volta che si mette in funzione un sistema elettrico ogni elemento conduttore si porta ad un potenziale diverso da quello di terra; essendo l'isolante proprio attorno a queste parti conduttrici, si ha che su di esso è applicata una differenza di potenziale e quindi un campo elettrico E . Il campo sollecita il materiale invecchiandolo. Il campo elettrico E rappresenta quindi la sollecitazione elettrica a cui è sottoposto il materiale, la sua intensità dipende sia dalla differenza di potenziale applicata, che dalle dimensioni dell'isolamento stesso.

Riferendosi ai cavi per alte tensioni (High Voltage - HV) il campo radiale, cioè quello che sollecita l'isolante, ha un'intensità molto maggiore rispetto al campo elettrico longitudinale, il secondo è quello che fa muovere le cariche nel conduttore determinando quindi la circolazione di corrente.

Nel caso in cui il campo elettrico applicato ad un isolante superi un determinato valore caratteristico del dielettrico, detto *rigidità dielettrica* (RD), si ha che il materiale perde le proprietà isolanti e questo si traduce in una scarica distruttiva, cioè in un arco elettrico che perfora l'isolante danneggiando l'apparato elettrico.

Perché un materiale venga considerato interessante dal punto di vista isolante deve avere un'elevata rigidità dielettrica, questo implica la possibilità di utilizzare piccoli spessori del materiale per garantire un alto grado di isolamento, traducendosi in una riduzione dei costi.

La scarica elettrica ha origine nei punti particolari del materiale, ad esempio dove vi è una alta concentrazione di campo elettrico o dove vi sono dei difetti. Per questo motivo è importante sapere la forma dell'isolamento e come varia il campo elettrico all'interno di esso.

La rigidità dielettrica è una grandezza stabilita statisticamente, è infatti difficile da determinare in quanto il suo valore è influenzato da molti fattori quali la forma degli elettrodi, la velocità di crescita della tensione, le dimensioni dell'isolamento ed altri. Inoltre è un fenomeno aleatorio, i risultati delle prove di rigidità dielettrica sono sempre affetti da una certa dispersione, il valore è quindi stabilito seguendo metodologie statistiche.

Un materiale durante la sua vita viene sottoposto a diverse sollecitazioni: elettriche, chimiche, termiche e radioattive. Queste vanno ad intaccare la struttura chimica del materiale modificandone le

proprietà che lo caratterizzano. Il peggioramento delle proprietà elettriche del materiale viene detto *invecchiamento del materiale*.

In linea di principio il grado di invecchiamento di un materiale può essere valutato tramite la misura della rigidità dielettrica, ci si aspetta infatti che tale grandezza vari in funzione del tasso di invecchiamento del materiale. Quindi bisognerebbe confrontare il valore della rigidità dielettrica su dei campioni vergini e confrontarlo con quello ottenuto sui campioni sottoposti agli stress sopracitati; si otterrebbe una diminuzione del valore legato quantitativamente al grado di invecchiamento del materiale. Nella realtà dei fatti questo metodo non può essere applicato perché si tratta di una misura distruttiva.

3.4.1 Rigidità dielettrica

Se si aumenta il campo elettrico applicato ad un isolante si arriva ad un valore per il quale, in modo improvviso, il materiale diventa conduttivo e viene attraversato da una corrente elettrica, si ha quindi la scarica distruttiva dell'isolante. Il valore del campo elettrico al quale avviene questa scarica è detto *rigidità dielettrica (electrical strength)* e viene espresso in kV/mm.

Come detto, però, questo valore è influenzato da numerosi fattori:

- Forma degli elettrodi: se gli elettrodi presentano delle zone che producono un elevato gradiente di campo si ha che la scarica dell'isolante avviene per valori di campo medi inferiori al caso di elettrodi piani o, comunque, con superfici ben lavorate.
- Pendenza della rampa di tensione: il materiale si porta alla scarica applicando una tensione continuamente crescente, più è veloce questa salita e più sarà alto il valore di scarica del materiale.; tale fenomeno può essere spiegato intuitivamente, infatti con rampe lente si ha che il materiale è sottoposto ad ogni valore di tensione per tempi più lunghi, quindi più stressato arriverà prima al valore di rottura.
- Tipo di tensione applicata: in base al tipo di sollecitazione si ottengono valori diversi di rigidità dielettrica, questa viene infatti distinta in rigidità dielettrica all'impulso, alla tensione continua e alla tensione alternata; generalmente quest'ultima è a valori inferiori rispetto alle altre due.
- Spessore del dielettrico: al crescere dello spessore dell'isolante la RD diminuisce; naturalmente al crescere dello spessore del dielettrico la tensione di scarica cresce ma non

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

in modo proporzionale allo spessore cosicché, ad esempio, raddoppiando lo spessore dell'isolante la tensione di scarica non raddoppia ($RD \propto d-x$ con $x > 1$).

- Superficie di prova: facendo la prova su una superficie più ampia è più probabile trovare delle disomogeneità del materiale. Le disomogeneità sono infatti punti deboli dove la scarica può avvenire prima; dato che la presenza di disomogeneità è del tutto aleatoria si capisce il motivo per il quale anche la rigidità dielettrica debba essere trattata aleatoriamente.
- Condizioni ambientali: la temperatura e l'umidità influenzano notevolmente l'esito della prova, infatti se queste aumentano hanno un effetto sul materiale rendendo possibile la scarica a campi minori.

Nei materiali solidi si ha la scarica quando l'energia posseduta dal reticolo cristallino raggiunge un certo valore tale che si manifestano delle mutazioni permanenti della struttura del materiale. A tale valore critico dell'energia corrisponde un calore critico di E_c del campo elettrico applicato al dielettrico, il quale dipende a sua volta da diversi fattori come la natura dell'isolante e la temperatura.

Se il valore del campo applicato non è superiore a quello del valore critico ($E < E_c$), il materiale raggiunge uno stato di equilibrio nel quale è presente una piccola corrente di conduzione data dalle cariche libere nel reticolo. In questa condizione anche la temperatura del materiale è costante ed inferiore al valore critico.

Se invece si è nella condizione di campo elettrico applicato superiore al valore del campo critico ($E > E_c$) allora nasce una situazione di instabilità che si traduce nella scarica dell'isolante, la quale può essere termica, oppure di tipo elettrico (in tal caso si parla di scarica intrinseca). In entrambe i casi la scarica si origina nel punto del materiale dove si raggiunge una temperatura superiore a quella associata al valore critico, si ha quindi un cedimento della struttura che porta alla scarica.

La differenza fra le due è che la prima ha origine da meccanismi macroscopici trattabili con le classiche formule del calore, mentre la seconda avviene a livello atomico e può essere trattata valutando la natura microscopica dei materiali. La scarica termica può avvenire soltanto se i fenomeni termici macroscopici hanno il tempo necessario per svilupparsi, cioè se il tempo che intercorre fra l'applicazione della corrente e la scarica è sufficientemente lungo (circa 1s); se la scarica si manifesta prima che avvenga il fenomeno di trasmissione del calore allora questa ha origine da fenomeni microscopici di natura elettronica.

Generalmente la scarica dovuta ad un impulso di tensione è di tipo elettronico, mentre la scarica dovuta alla AC o alla DC è di tipo termico.

In questo lavoro si parla di distribuzione di carica dovuta all'effetto di campi elettrici continui, quindi è logico concentrarsi sulle scariche per instabilità termica.

Un materiale isolante omogeneo sottoposto ad un campo elettrico continua ha delle perdite per *effetto Joule* causate dalla conducibilità γ non nulla:

$$W(\theta) = \gamma(\theta)E^2 \quad (3.31)$$

La conducibilità dipende dalla temperatura θ in maniera esponenziale.

A causa di queste perdite la temperatura del dielettrico si alza e l'isolante inizia a scambiare calore con l'ambiente esterno. La potenza specifica scambiata appunto fra ambiente esterno e isolante sarà data dall'espressione:

$$p(\theta) = \frac{\lambda S}{\tau}(\theta - \theta_0) \quad (3.32)$$

Dove λ è il coefficiente di trasmissione del calore, S è la superficie di smaltimento, τ il volume del dielettrico e θ_0 la temperatura che il dielettrico aveva prima dell'effetto delle perdite Joule.

Eguagliando le due equazioni sopra descritte (3.31) e (3.32) si ottiene l'equazione di bilancio che esprime l'equilibrio termico dell'isolante:

$$\gamma(\theta)E^2 = \frac{\lambda S}{\tau}(\theta - \theta_0) \quad (3.33)$$

Questa relazione vale fin quando il valore del campo elettrico E non supera quello del campo elettrico critico E_c . Oltre a tale valore la potenza prodotta dalle perdite è maggiore della potenza dissipata, si ha quindi un aumento continuo della temperatura sin quando il dielettrico perde le sue proprietà isolanti.

Se all'equazione (3.33) si impongono le condizioni critiche $E=E_c$ e $\theta=\theta_c$, inoltre esplicitando la dipendenza dallo spessore del materiale dielettrico (3.34), si ha:

$$\frac{\lambda S}{\tau} = \frac{K}{d} \quad (3.34)$$

$$\gamma(\theta)E_c^2 = \frac{\lambda S}{\tau}(\theta_c - \theta_0) \quad (3.35)$$

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

Supponendo ora di avere un materiale dielettrico completamente omogeneo, dall'equazione (3.35) si può ottenere la relazione che permette di quantificare la rigidità dielettrica *inerente* (calcolata considerando il materiale privo di disomogeneità), cioè il campo elettrico critico E_c in funzione dello spessore del materiale d .

$$E_c = RD_{inerente} = \frac{1}{\sqrt{d}} \sqrt{\frac{K(\theta_c - \theta_0)}{\gamma(\theta)}} = \frac{K_1}{\sqrt{d}} \quad (3.36)$$

Questa relazione, come premesso, vale nel caso in cui gli effetti termici macroscopici abbiano il tempo di manifestarsi, cioè il tempo che intercorre fra la scarica e l'applicazione del campo elettrico deve essere sufficientemente lungo. La rigidità dielettrica reale sarà quindi inferiore a quello ottenuto dall'equazione (3.37), in quanto nella realtà dei fatti la disomogeneità porta delle debolezze nella struttura del dielettrico. Tuttavia la $RD_{inerente}$ è utile per fare un confronto macroscopico sui vari materiali in modo da decidere quale valga la pena investigare e sviluppare per le applicazioni in alta tensione.

3.4.2 Invecchiamento elettrico

Quando si parla di invecchiamento si intende l'alterazione irreversibile nel tempo delle proprietà del materiale causata dalle sollecitazioni ad esso applicate.

Il materiale dielettrico è la parte del sistema elettrico che più è soggetta al fenomeno dell'invecchiamento, per questo motivo sono gli isolanti stessi a definire l'invecchiamento dell'intero apparato.

Lo studio dell'invecchiamento elettrico consiste nel valutare gli effetti sull'isolante di una sollecitazione elettrica mantenuta costante nel tempo. La vita dell'isolante risulta tanto più breve quanto più alto è il campo elettrico applicato. Questo effetto non è caratterizzato da una dipendenza lineare, bensì un piccolo aumento percentuale del gradiente elettrico può portare anche ad un dimezzamento della vita del materiale. Inoltre vi è una forte sinergia fra sollecitazione termica ed elettrica, quindi la riduzione della vita può essere intollerabile.

L'invecchiamento del materiale dovuto alla tensione applicata si presenta con un progressivo peggioramento delle sue proprietà fino al momento in cui avviene il cedimento, e quindi la scarica.

L'arco elettrico ha come fenomeno scatenante quello delle scariche parziali che avvengono nei piccoli vuoti o nelle microscopiche fessure che si hanno all'interno dell'isolante o fra isolante e conduttore; queste scariche creano un canale ramificato di prescarica detto arborescenza elettrica,

universalmente noto con il termine inglese *treeing*. Quando questa arborescenza arriva a collegare i due elettrodi si ha il fenomeno della scarica.

In AC si ha una scarica ogni volta che il campo elettrico supera il valore di soglia di innesco delle scariche parziali. Anche se ogni singola scarica ha un piccolo contenuto energetico si ha che l'elevata frequenza di ripetizione del fenomeno porta ad una lenta e costante erosione e decomposizione chimica del materiale, questo porta alla formazione di un microscopico canale ramificato che si sviluppa nella direzione dell'altro elettrodo. Si possono quindi distinguere due periodi nella generazione dell'arco: il periodo di formazione del canale ramificato in cui si creano le condizioni per il suo sviluppo (*treeing formation*), il periodo in cui il canale cresce (*treeing growth*).

Il comportamento dei materiali isolanti sottoposti ad uno stress elettrico può essere illustrato con la curva di vita elettrica, mostrata per un caso generale in Figura 3.16.

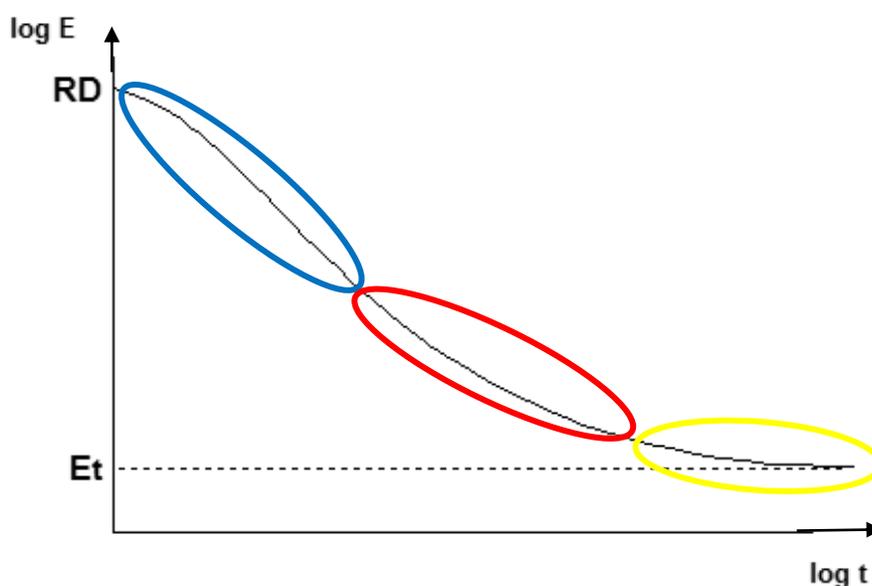


Figura 3.17

Curva di vita elettrica in un caso generale. L'area punteggiata corrisponde allo sviluppo di scariche parziali (crescita del treeing)

Nel grafico possono essere individuate tre aree.

La prima parte (in blu) in cui vi sono forti scariche parziali fin dall'inizio dell'applicazione della tensione, poiché la sollecitazione elettrica è maggiore del livello di innesco delle scariche parziali (E_i). Ciò significa che l'isolante avrà una vita molto breve dato che si avrà uno sviluppo del canale di scarica in un tempo ridotto, quindi il periodo di formazione del canale di scarica è pressoché nullo.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

La seconda parte (in rosso) riguarda le sollecitazioni minori di E_i (ma maggiori di E_t) ed è praticamente rettilinea. In questa parte si possono distinguere i due periodi di invecchiamento a cui si è accennato sopra, cioè un primo periodo (formazione del treeing) ove non sono rilevabili scariche parziali ma l'invecchiamento procede ugualmente anche se con grande lentezza ed un secondo periodo (crescita del treeing) in cui sono invece evidenti le scariche parziali che danno luogo ad una struttura arborescente (il canale di scarica o treeing, appunto) che si espande fino alla scarica completa dell'isolante.

Infine la terza parte (in giallo) è caratterizzata da una linea che tende a diventare orizzontale, questo perché il campo di funzionamento si avvicina al valore del gradiente elettrico di soglia E_t . al di sotto del valore E_t non si ha né la formazione del canale di prescarica né, tantomeno, lo sviluppo di tale canale. E_t è quindi la soglia di invecchiamento al di sotto della quale non si hanno gli effetti dell'invecchiamento elettrico.

Il modello sopra illustrato è di validità totalmente generale, la lunghezza di ogni parte descritta varia da materiale a materiale, oltre che ad avere una forte dipendenza da fattori ambientali come umidità e temperatura.

Nella realtà le curve relative al XLPE tendono al valore di soglia già dopo poche migliaia di ore; al contrario per il polietilene (PE) e la gomma etilpropilenica (EPR) per le quali la caratteristica di vita inizia a curvare in direzione del valore di soglia solo dopo diecimila ore. Per il secondo tipo di materiali la curva presenta un leggero andamento verso il basso che però diventa evidente solo a temperature superiori di quella ambiente.

L'espressione per la legge di vita più utilizzata è il cosiddetto *Modello dell'Inversa Potenza* (*Inverse Power Model, IPM*):

$$L = C \cdot E^{-n} \quad (3.37)$$

Dove L è la vita elettrica, E il campo elettrico, C una costante dipendente dalle condizioni ambientali e n il coefficiente di resistenza alla tensione (*voltage endurance coefficient: VEC*).

In un diagramma bilogarithmico ($\log E$ vs. $\log L$) l'equazione 3.37 rappresenta una retta di pendenza $-1/n$; pertanto n è il parametro che si assume per caratterizzare il materiale dal punto di vista della sollecitazione elettrica. Nello specifico, n di valore elevato daranno una caratteristica poco pendente che si traduce in un miglior materiale isolante. A parità di rigidità dielettrica iniziale e fissato un certo valore di campo elettrico, si ha che maggiore è n (cioè più è orizzontale la retta) maggiore è la vita corrispondente a quel valore di campo.

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio

Per confrontare i materiali tramite prove di breve durata assume una particolare importanza la rigidità dielettrica a breve termine, ES_0 , che indica il valore di gradiente elettrico che, mantenuto costante, provoca la scarica dell'isolante dopo un tempo relativamente breve t_0 .

Si può quindi utilizzare una forma più immediata rispetto al Modello dell'Inversa Potenza 3.37; una volta noto n è possibile prevedere la vita L del materiale per un dato valore della sollecitazione E :

$$L = t_0 \cdot \left(\frac{E}{ES_0} \right)^{-n} \quad (3.38)$$

3. I materiali polimerici e la formazione di carica di spazio



MISURA DELLA CARICA DI SPAZIO: IL METODO PEA

Capitolo 4

Nel seguente capitolo verranno elencati e discussi i vari metodi utilizzati per la misura delle cariche di spazio. Particolare attenzione verrà prestata alla fisica del metodo PEA e al significato dei dati ottenuti

4. MISURA DELLA CARICA DI SPAZIO: IL METODO PEA

L'importanza della carica spaziale sulle prestazioni dei materiali polimerici isolanti, effetto particolarmente importante in corrente continua, è stata discussa nei Capitoli 2 e 3. Con riferimento a quanto detto risulta, quindi, comprensibile come tale argomento abbia interessato molti ricerche in tutto il mondo.

Nei primi anni '70, quando si iniziò la produzione di cavi per applicazioni HVDC, gli unici metodi disponibili per l'individuazione di cariche di spazio nei materiali erano metodi distruttivi. Questo rendeva difficile sia la realizzazione del test, ma anche la comprensione dei risultati forniti. Da fine anni '70 ai primi degli anni '90 sono stati sviluppate varie tecniche per la valutazione della carica di spazio. Inizialmente vennero proposti numerosi metodi di studio della carica, nel tempo però solo alcuni di questi vennero sviluppati e divennero metodi più precisi e affidabili per la valutazione delle cariche di spazio.

Nei laboratori mondiali è ormai diventato un test di routine quello relativo alla valutazione delle cariche di spazio, per questo tipo di misure vengono usati metodi che si basano su vari principi fisici. In generale, questi metodi utilizzano sollecitazioni termiche o meccaniche non uniformemente distribuite, le quali interagiscono con le cariche spaziali intrappolate producendo risposte in funzione della quantità e della posizione delle cariche stesse. Queste risposte vengono acquisite da appositi sensori e trasduttori che traducono la sollecitazione di risposta in un segnale decifrabile.

I metodi stabilizzati e al momento utilizzati a questo scopo sono:

1. Thermal Pulse Method (TPM)
2. Thermal Step Method (TSM)
3. Laser Intensity Modulation Method (LIMM)
4. Pressure Wave Propagation method (PWP)
5. Laser Induced-Pressure Pulse method (LIPP)
6. Pulse Electro-Acoustic method (PEA)

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

I primi tre metodi possono essere classificati come metodi termici, di fatti sono metodi basati sull'applicazione di un gradiente termico. Gli ultimi tre invece sono classificabili come metodi che sfruttano la propagazione delle onde all'interno del materiale.

Di seguito, in questo capitolo verranno descritti i principi alla base dei vari metodi e il loro funzionamento. Si porterà particolare attenzione al metodo dell'Impulso Elettro-Acustico, uno dei metodi maggiormente diffusi e utilizzati, che sarà poi argomento principale della discussione di questa tesi.

4.1 Metodi basati sulle sollecitazioni termiche

I metodi termici possono essere sostanzialmente distinti in base al sistema di riscaldamento che usano. Possono essere usati dei laser o delle luci con una determinata frequenza d'onda. A seconda del metodo utilizzato i campioni possono avere delle facce metallizzate, che fungono da elettrodi, su un lato o su entrambe; in tutti i casi, l'energia assorbita si diffonde nel campione e provoca un'espansione termica e quindi cambiamenti nella permittività dielettrica. Ciò si traduce in una variazione del potenziale di superficie in un campione in circuito aperto (ad esempio, un lato metallizzato) o in correnti di conduzione in un campione cortocircuitato.

4.1.1 Metodo dell'impulso termico TPM (Thermal Pulse Method)

Il metodo dell'impulso termico consiste nell'applicare, mediante un breve ed intenso lampo di luce della durata di circa $8\mu\text{s}$, un impulso di calore ad una delle superfici del campione in esame e nel misurare la risposta elettrica generata dal campione; lo schema è rappresentato in Figura 4.1. L'impulso di luce è generalmente ottenuto mediante una lampada a scarica in un gas.

Le informazioni sulla distribuzione di carica sono date dalla risposta elettrica a tale sollecitazione nel tempo. Le informazioni ottenute, però, non danno un riscontro immediato sulla misura del materiale, infatti la valutazione del pattern può essere fatta solo dopo un'appropriata deconvoluzione del segnale misurato. Ciò comporta delle limitazioni all'effettiva utilità di questo metodo e richiede che i risultati siano appropriatamente interpretati e la valutazione non può essere quindi fatta "live".

Molte tecniche di analisi sono state proposte per interpretare i dati ottenuti con questo metodo; una delle più interessanti e utilizzate è quella proposta che sfrutta la trasformata in serie di Fourier.

Le variazioni della tensione tra le facce del campione, $\Delta V(t)$ in Figura 4.1, sono dovute all'espansione termica non uniforme e a locali variazioni della costante dielettrica. Queste tensioni sono misurate in funzione del tempo impiegato dall'impulso di calore per diffondere dall'elettrodo bersaglio ($x = 0$) a quello opposto ($x = d$).

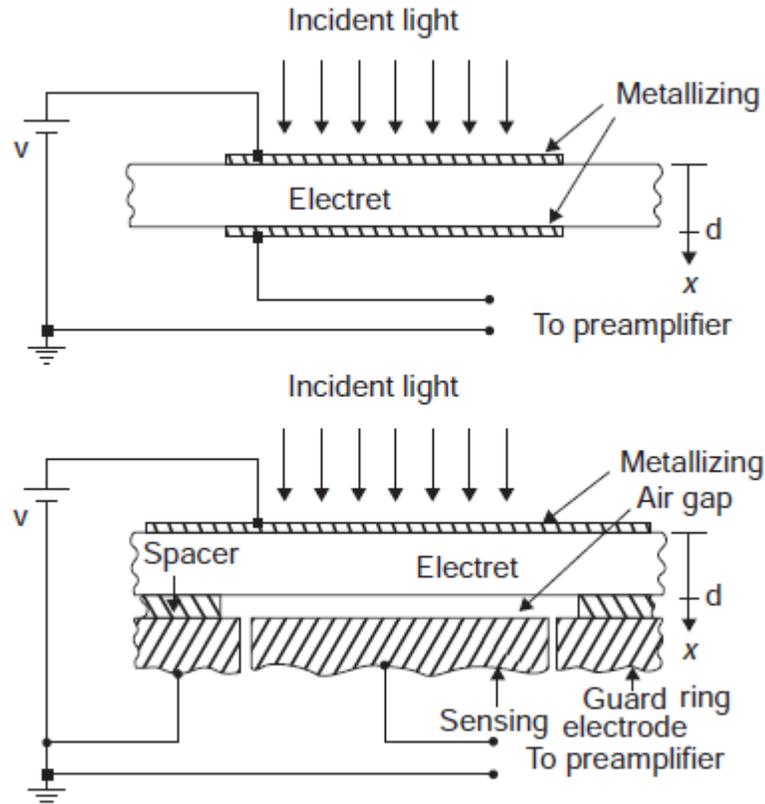


Figura 4.1

Schema del metodo dell'impulso termico, nelle due configurazioni per campioni metallizzati su entrambi i lati o su un solo lato [2].

La risposta misurata è appunto la $\Delta V(t)$, essa è legata alla distribuzione della carica, ma anche alla polarizzazione e alla variazione di temperatura. Questo legame è espresso dall'equazione:

$$\Delta V(t) = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \int_0^d \left\{ \left[A \rho(x) - B \frac{dP(x)}{dx} \right] \int_0^x \Delta T(x') dx' \right\} dx \quad (4.1)$$

Con $A = \alpha_x - \alpha_\epsilon$ e $B = \alpha_p - \alpha_x - \alpha_\epsilon$. I termini α_x , α_ϵ e α_p rappresentano il coefficiente di espansione termica e i coefficienti di temperatura rispettivamente della costante dielettrica e della polarizzazione.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

$\rho(x)$ e $P(x)$ sono invece, rispettivamente, la distribuzione interna di carica e la distribuzione di polarizzazione.

4.1.2 Metodo del laser ad intensità modulata LIMM (Laser Intensity Modulation Method)

La tecnica LIMM utilizza il riscaldamento superficiale modulato sinusoidalmente di materiali dielettrici per produrre distribuzioni di temperatura lungo lo spessore del provino non uniformi. In questa tecnica, ciascuna superficie del campione, solitamente un film sottile, viene esposta a un raggio laser che è modulato in modo sinusoidale mediante un modulatore ottico (*light chopper*). Il raggio laser viene assorbito dalla parte anteriore dell'elettrodo del campione. La modulazione sinusoidale del raggio laser provoca una fluttuazione sinusoidale della temperatura dell'elettrodo anteriore, con conseguente propagazione delle onde di temperatura nel campione. Le onde di temperatura si attenuano mentre avanzano nel campione, venendo inoltre ritardate in fase.

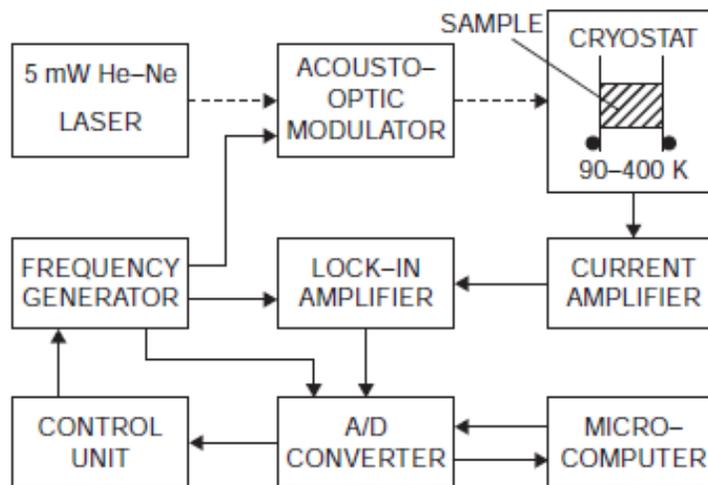


Figura 4.2

Schema a blocchi dell'implementazione della tecnica LIMM [1].

Nel provino agisce quindi una “*forza termica*” non uniformemente distribuita la cui interazione con la carica spaziale, o con la distribuzione di polarizzazione, origina una corrente piroelettrica con andamento sinusoidale. Questa corrente è una funzione della frequenza di modulazione e delle distribuzioni di carica, sia spaziale che di polarizzazione.

La corrente è data dalla formula:

$$I(t) = \frac{S}{d} \int_0^{x'} G(x) \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} dx \quad (4.2)$$

Dove S e d sono le dimensioni del campione, T è la temperatura e $G(x)$ è la funzione di distribuzione che dipende dalle caratteristiche piroelettriche del materiale e dalla densità totale di carica ρ_t , data dalla somma della densità di carica spaziale con la densità di carica della polarizzazione permanente. Quello che si ottiene in uscita è quindi un segnale tensione-frequenza.

Il test viene fatto per un range variabile di frequenze, da 100 Hz a 100 kHz e riscaldando entrambe i lati del provino. La prova è relativamente lunga e, anche in questo caso, il segnale ottenuto deve essere elaborato tramite deconvoluzione; si utilizza ancora una volta la deconvoluzione in serie di Fourier che è stata descritta per il metodo TPM (paragrafo 4.1.1).

4.1.3 Metodo del gradiente termico TSM (Thermal Step Method)

Il metodo del gradino termico utilizza una variazione termica applicata su un isolatore per produrre una corrente risposta all'espansione termica del campione. Il gradino termico crea un'onda termica che si propaga all'interno dello spessore dell'isolamento, generando quindi uno spostamento locale temporaneo della carica spaziale. Questo è percepito dagli elettrodi come una variazione delle cariche indotte, si ha quindi la formazione di una corrente tra gli elettrodi. La misurazione e l'elaborazione matematica di tale corrente consente la determinazione della distribuzione del campo elettrico e della densità di carica nel campione. Il TSM è applicabile a qualsiasi campione che presenti una geometria per la quale sia possibile calcolare la distribuzione spazio-tempo della temperatura, come cavi, condensatori o avvolgimenti dei trasformatori.

La fase termica viene creata imponendo un gradiente di temperatura nel materiale, generalmente riscaldando un lato campione rispetto all'altro mediante l'applicazione di una differenza di temperatura costante tra i due elettrodi. Il metodo è non distruttivo poiché la temperatura massima raggiunta è vicina alla temperatura ambiente.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

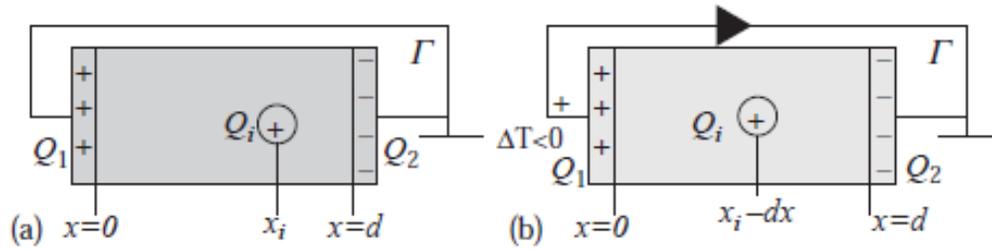


Figura 4.3

Principio di funzionamento del TSM nella condizione di cortocircuito. Il campione è all'equilibrio termico T_0 nell'immagine a e in condizione di gradino di temperatura applicato nella figura b [2].

In Figura 4.3 è rappresentato lo schema utilizzato per il TSM in condizione di cortocircuito. La presenza della carica nel punto x_i induce una carica Q_1 e Q_2 negli elettrodi, questa carica è dipendente dalla Q_i e dalla geometria del sistema studiato:

$$Q_1 = -\frac{d-x_i}{d}Q_i \quad Q_2 = -\frac{x_i}{d}Q_i \quad (4.3)$$

Applicando un gradiente termico si ha la variazione della conducibilità nel materiale, quindi la carica intrappolata avrà modo di muoversi di un dx . La variazione dell'ascissa causa, di conseguenza, una variazione nella carica sugli elettrodi; in questo caso la carica Q_2 può essere calcolata come:

$$Q_1 = -\frac{Q_i x_i}{d} \left[1 + \frac{\alpha}{x_i} \int_0^{x_1} \Delta T(x, t) dx - \frac{\alpha}{d} \int_0^d \Delta T(x, t) dx \right] \quad (4.4)$$

Dove α è un parametro ottenuto dalle caratteristiche dielettriche del provino.

La variazione di carica si riflette nel circuito aparendo come una corrente, la cosiddetta *Thermal Step Current*: $I(t)$. Questa corrente, con valori che oscillano dal pA al μA , dipende dalla distribuzione di carica nel provino attraverso la relazione:

$$I(t) = -\alpha C \int_0^d E(x) \frac{\partial \Delta T(x, t)}{\partial t} dx \quad (4.5)$$

Con C uguale alla capacità del campione prima dell'applicazione del gradino di corrente.

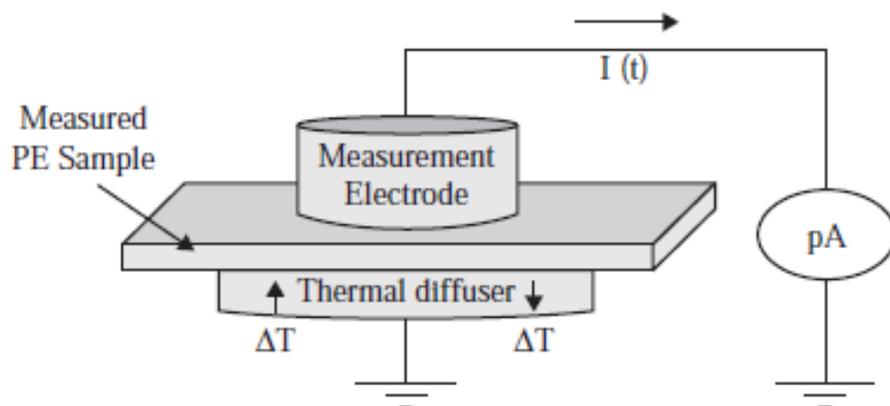


Figura 4.4

Setup per la misura della Thermal Step Current in condizione di provino cortocircuitato [1].

Per la determinazione della $E(x)$ è necessario conoscere con precisione la derivata temporale del gradiente di temperatura. Per l'elaborazione dei dati si può ancora una volta utilizzare la serie di Fourier.

Come si vede dallo schema, questa prova viene fatta a vuoto, cioè senza tensione applicata al provino. Per studiare l'evoluzione temporale della carica sarebbe utile, invece, fare la misura col campo elettrico in DC applicato. Con una tensione DC applicata si ha però che la Thermal Step Current viene mascherata dalla corrente di conduzione e dalla polarizzazione del materiale.

Per ovviare a questo problema si usa il cosiddetto "provino di compensazione", descritto in Figura 4.5a e 4.5b. In questo caso vengono messi due provini in serie separati da un elettrodo, quest'ultimo è collegato alla sorgente DC.

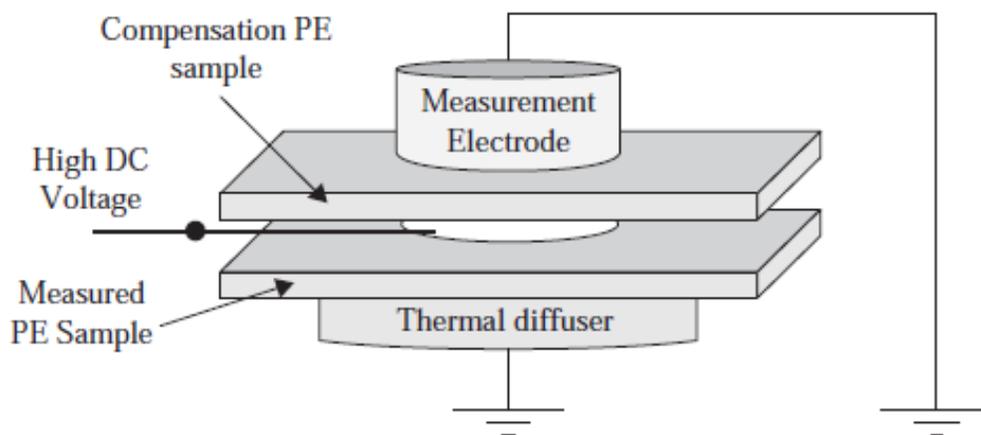


Figura 4.5a

Configurazione TSM con provino di compensazione. Fase di applicazione della tensione DC.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

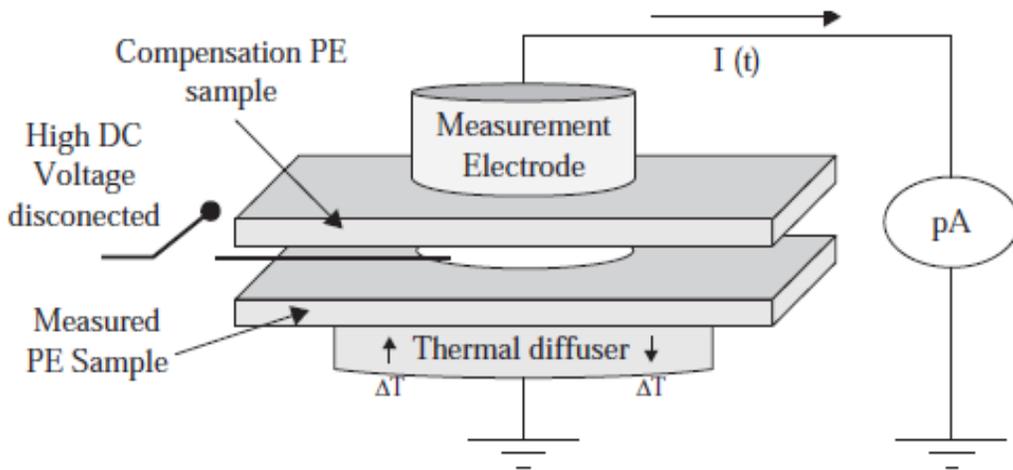


Figura 4.5b

Configurazione TSM con provino di compensazione. Fase di misura della TSC [1].

Con questa configurazione la misura TSM viene divisa in due parti:

- Prima si applica la tensione all'elettrodo fra i due campioni (Figura 4.5a) e si polarizza il materiale. È come se i due campioni fossero due condensatori posizionati in parallelo.
- Per evitare di avere una misura influenzata dalla corrente di polarizzazione o di conduzione, nel momento in cui si effettua la misura, la sorgente DC viene disconnessa (Figura 4.5b). Il sensore di corrente è collegato al campione di compensazione; a questo punto, essendo DC scollegato, i due campioni sono in serie e si fa la misura di corrente.

La corrente misurata avrà la stessa espressione dell'equazione 4.5, l'unica differenza sarà nel valore di C che, in questo caso, non è dato dalla sola capacità del provino, ma dalle capacità dei due in serie.

Inizialmente lo spessore dei provini utilizzabili per questa misura era ridotto per via delle tecniche di riscaldamento lente e poco precise; al giorno d'oggi si può utilizzare questo metodo per materiali dielettrici con spessore da 20 mm a 10 μm .

4.2 Metodi basati sulla propagazione delle onde di pressione

Per la valutazione della carica di spazio all'interno di un materiale è possibile utilizzare il fenomeno della propagazione delle onde di pressione.

Per capire questo fenomeno si consideri un materiale dielettrico ideale piano, con conduttività nulla e contenente al suo interno carica spaziale e dipoli permanenti. Il ragionamento verrà fatto per un materiale piano, ma si vedrà poi che anche il caso di conduttori cilindrici può essere riportato a queste considerazioni, salvo i disturbi introdotti dalla geometria.

Il provino viene inserito fra due piastre conduttrici in maniera tale che le facce delle piastre e del provino siano perpendicolare all'asse z . Si assume che le variabili in gioco siano uniformi nelle direzioni perpendicolari a z , inoltre che la distribuzione di carica sia descritta da una funzione $\rho(z)$ e che la polarizzazione permanente può essere rappresentata da una distribuzione di carica $\rho_p(z) = -dP/dz$.

Per le scale temporali coinvolte si considera la polarizzazione con risposta istantanea all'applicazione del campo elettrico, essa è caratterizzata quindi da una permeabilità a frequenza infinita.

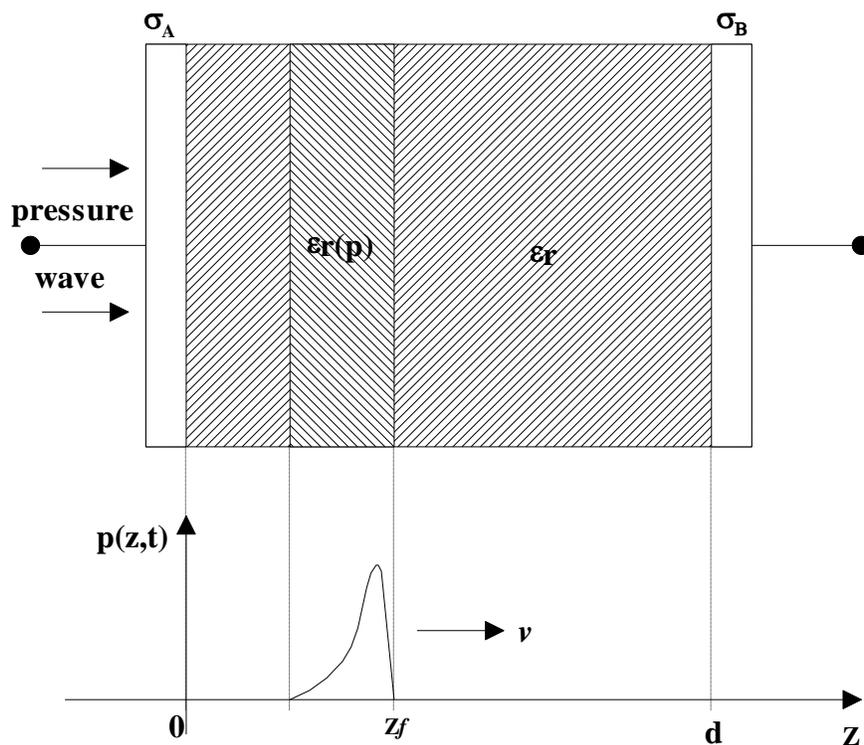


Figura 4.6

Schema di principio basato sulla propagazione di un'onda di pressione [2].

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

All'istante $t=0$ viene applicata in maniera uniforme una compressione su una faccia del provino, attraverso l'elettrodo che in Figura 4.6 è indicato dalla lettera A. la pressione genera un fronte d'onda z_f che si propaga attraverso il materiale alla velocità del suono nel materiale in esame.

La perturbazione meccanica produce due effetti nello strato di materiale in esame in quanto viene compressa la sua struttura reticolare: la carica intrappolata nel reticolo atomico si sposta e la permittività relativa ϵ_r varia a causa della variazione locale dei dipoli.

In base alla distribuzione spaziale delle cariche all'interno del dielettrico e alle caratteristiche dell'onda di pressione, si ha che la variazione prodotta dalla sollecitazione genera a sua volta una variazione della carica su A e B. In funzioni delle condizioni del setup di prova (circuitto aperto o circuitto chiuso) la variazione della carica indotta sugli elettrodi può essere misurata come una corrente o come una differenza di potenziale.

L'evoluzione temporale della grandezza misurata contiene informazioni sulla distribuzione di carica spaziale. Il fronte d'onda dell'onda di pressione agisce, quindi, viaggiando all'interno del materiale alla velocità del suono e ha la stessa funzione di una sonda sensibile alla carica che scansiona lo spessore del campione.

Sulla base delle ipotesi fatte e utilizzando le leggi fondamentali dell'elettrostatica, comprensive di condizioni al contorno, è possibile stabilire una relazione tra la risposta elettrica misurata e la distribuzione di carica all'interno del provino.

Considerando uno strato di dielettrico contenente carica spaziale e polarizzazione permanente P, si ha una densità di carica totale: $\rho(z) = \rho_s(z) - dP/dz$. Nel caso di circuitto aperto viene valutata la differenza di potenziale $V(t)$ che si manifesta tra gli elettrodi durante la propagazione dell'onda di pressione. Questa tensione può essere espressa dall'equazione:

$$V(t) = XG(\epsilon_r) \int_0^{z_f} E(z, 0)p(z, t) dz \quad (4.5)$$

Nell'equazione si ha $z_f=vt$ che è la coordinata del fronte d'onda, $p(z, t)$ è il profilo dell'onda di pressione, $E(z, 0)$ è il profilo del campo elettrico nel campione all'istante in cui viene applicata la compressione e X è la compressione del materiale. $G(\epsilon_r)$ è la funzione che descrive la dipendenza della ϵ_r in funzione della pressione.

In condizioni di cortocircuito invece si rileva la corrente $I(t)$ e si ha che il suo valore dipende dalla distribuzione di campo elettrico secondo la seguente relazione:

$$I(t) = XC_0G(\epsilon_r) \int_0^{z_f} E(z, 0) \frac{\partial p(z, t)}{\partial t} dz \quad (4.6)$$

I parametri in gioco sono i medesimi della relazione 4.5, l'unico parametro che si aggiunge è C_0 che corrisponde alla capacità del campione non compresso.

Queste relazioni mostrano che, nota la $p(z, t)$, la distribuzione del campo elettrico $E(z, 0)$ può essere ottenuta dalla misura di $V(t)$ o $I(t)$, risolvendo le equazioni 4.5 e 4.6. una volta calcolata la distribuzione del campo elettrico si può risalire alla distribuzione totale di carica $\rho(z)$ applicando il teorema di Poisson, mediante la derivata della distribuzione di campo elettrico.

4.2.1 Metodo di propagazione dell'onda di pressione PWP (Pressure Wave Propagation)

Come spiegato in precedenza il metodo si basa sull'utilizzo di un'onda di pressione che funge da sonda attraversando il materiale.

L'impulso di pressione $p(t)$ è generato utilizzando un trasduttore piezoelettrico utilizzato in maniera inversa, viene quindi applicato un impulso di tensione $V_p(t)$ di breve durata, che si traduce in una rapida espansione del materiale. L'onda di pressione si propaga attraverso il volume del materiale andando a perturbare le cariche che sono intrappolate nel reticolo.

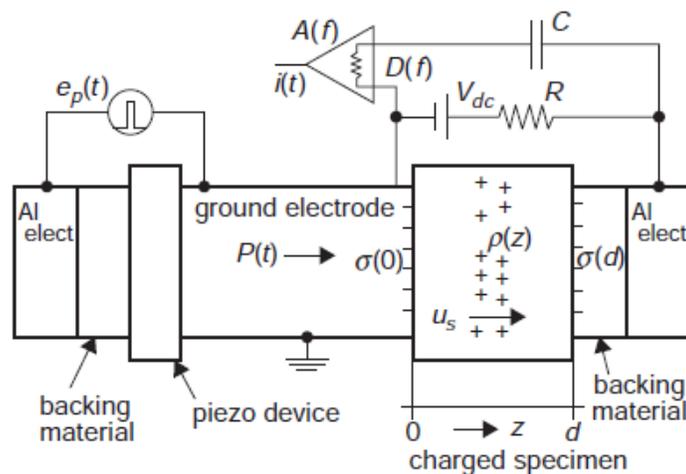


Figura 4.7

Schema del metodo PWP con l'onda di pressione generata dal trasduttore piezoelettrico [1].

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

Il movimento microscopico delle cariche, dovuto all'impulso acustico, causa una variazione di carica $q(t)$ sugli elettrodi che può essere rilevata tramite la corrente $i(t)$. La corrente misurata è proporzionale alla distribuzione di carica spaziale $\rho(z)$ all'interno del campione.

Questo metodo può essere utilizzato anche per valutare l'evoluzione temporale della distribuzione di carica all'interno del materiale. Il limite è però dato dal tipo di campioni testabili; la prova viene fatta su lastre di materiale di spessore che varia da 50 a 200 μm .

4.2.2 Metodo dell'impulso di pressione indotto dal Laser LIPP (Laser Induced Pressure Pulse method LIPP)

Il metodo LIPP è del tutto analogo al metodo della propagazione dell'onda di pressione PWP, differendo solo nel metodo di generazione dell'onda di pressione. In questo caso si ha un impulso laser ad alta intensità che viene sparato su un elettrodo posizionato adiacente al provino. L'elettrodo assorbe l'energia del laser e subisce una rapida espansione producendo quindi nel dielettrico un breve, ma intenso, impulso di pressione $p(t)$. Lo schema del sistema di funzionamento è rappresentato in Figura 4.8.

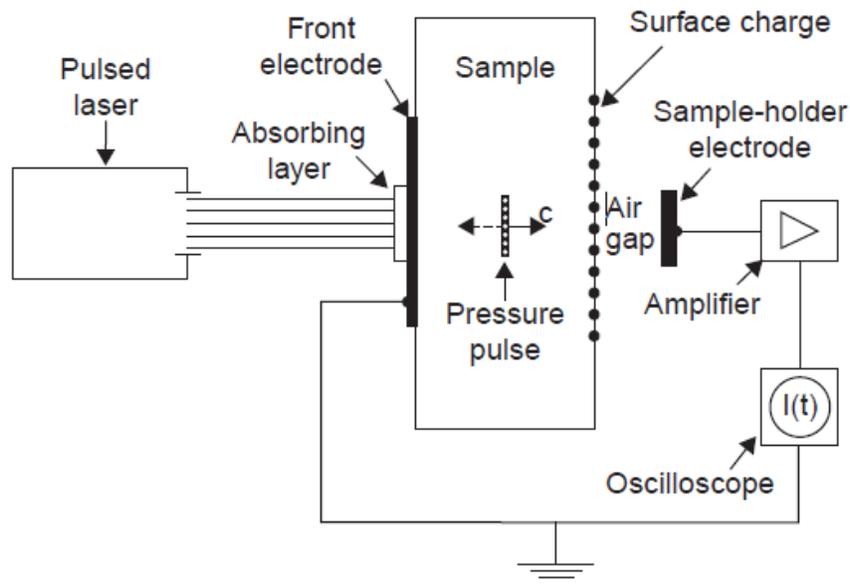


Figura 4.8

Setup sperimentale del metodo LIPP per la valutazione della carica elettrica spaziale [1].

Rispetto al metodo PWP, il metodo LIPP ha il vantaggio di generare un fronte d'onda di pressione molto stretto, che si traduce in una risoluzione maggiore della misura. Questa variazione di pressione attraversa il campione inducendo una variazione delle proprietà del materiale e quindi un mutamento della carica $q(t)$ sugli elettrodi, quest'ultimo viene a sua volta rilevato come una variazione di corrente $i(t)$. Se la lunghezza della regione compressa è sufficientemente piccola, il profilo della corrente risulta direttamente proporzionale alla distribuzione di carica compressa fra gli elettrodi.

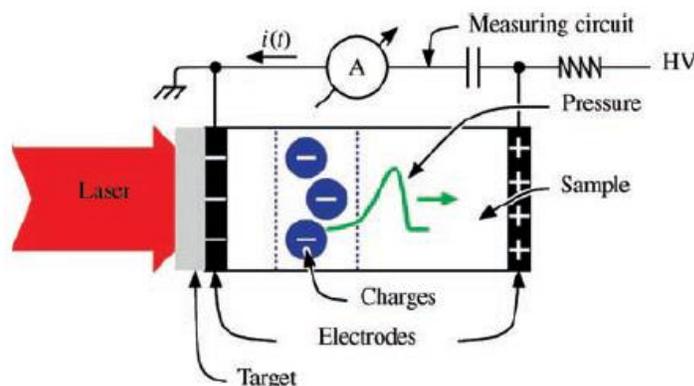


Figura 4.9

Principio di funzionamento del LIPP. In particolare, si vede la generazione dell'onda di pressione data dalle cariche e la sua propagazione all'interno del materiale [1].

Il tipico impulso laser utilizzato ha una durata di 70ps ed energia compresa tra 1 e 10 mJ, su un'area di circa 0.1 cm².

Ulteriore vantaggio di questo metodo rispetto al PWP è che, avendo una diretta proporzionalità fra $i(t)$ e $q(t)$, non c'è bisogno di fare la deconvoluzione del segnale, ma si valuta il profilo misurato.

4.2.3 Metodo del Piezo/Piezo trasduttore

Questo metodo prevede l'utilizzo di due piezoelettrici, uno ad ogni capo del provino. L'onda di pressione $p(t)$ viene generata dal primo piezoelettrico, esattamente per come avviene nel metodo PWP, e si propaga attraverso tutto il materiale. La propagazione del fronte d'onda perturba le cariche intrappolate che, agitandosi, creano a loro volta onde di pressione rilevate poi dal secondo piezoelettrico.

Le sollecitazioni ricevute dal trasduttore piezoelettrico vengono quindi convertite in tensione rilevabile $v_s(t)$, questa risulta proporzionale alla distribuzione di carica spaziale.

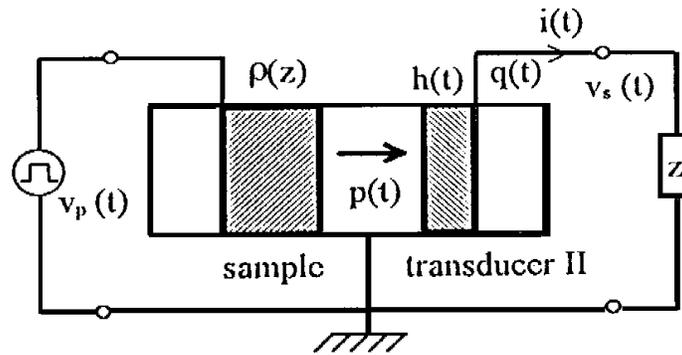


Figura 4.10

Schema di funzionamento del metodo piezo/piezo per la rilevazione di cariche spaziali [2].

4.2.4 Metodo dell'impulso elettro-acustico PEA (Pulse Electro-Acoustic method)

Questo metodo è un'evoluzione del metodo del piezo/piezo trasduttore, l'evoluzione sta nel metodo di sollecitazione delle cariche. Partendo dal metodo esposto nel paragrafo 4.2.3 si elimina il primo piezoelettrico e si utilizza una sollecitazione di tipo elettrico, quindi, secondo la legge di Coulomb, si ha una forza applicata sulle cariche interne al materiale. Supponendo una sollecitazione di tipo impulsivo, anche le cariche avranno una perturbazione analoga; la perturbazione provoca un'onda di pressione $p(t)$ che si propaga all'interno del materiale alla velocità del suono nel relativo materiale. L'onda arriva dunque al piezoelettrico che funge da rilevatore e viene trasformata in tensione, il principio di funzionamento di questa tecnica è rappresentato in Figura 4.11.

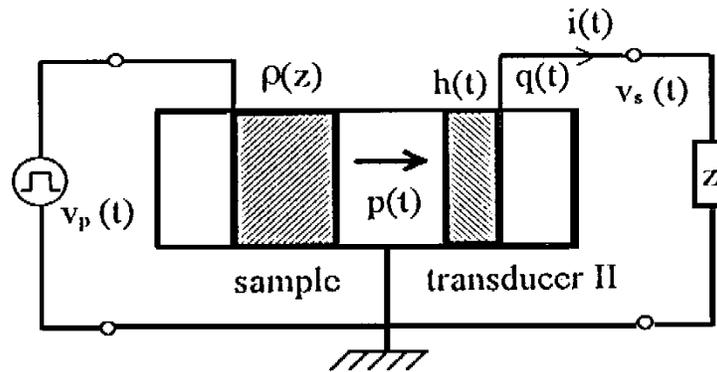


Figura 4.11

Principio di funzionamento del metodo dell'impulso elettroacustico per la rilevazione della carica elettrica [2].

Il principale vantaggio del PEA, rispetto ai metodi precedentemente descritti, sta nel fatto che il circuito di alta tensione e quello di rilevazione dell'onda di pressione sono elettricamente separati, grazie

al collegamento a terra dell'elettrodo posto tra campione e trasduttore. Con questo metodo, anche se si avesse la scarica del materiale dielettrico, l'elettrodo di terra può fornire una protezione al sistema di misura (amplificatore oscillografico) posti in cascata al piezoelettrico. Proprio per questo motivo il metodo PEA è considerato quello più sicuro e efficiente, dei metodi proposti, per lo studio dell'evoluzione delle cariche di spazio in provini sottoposti ad elevati valori di tensione.

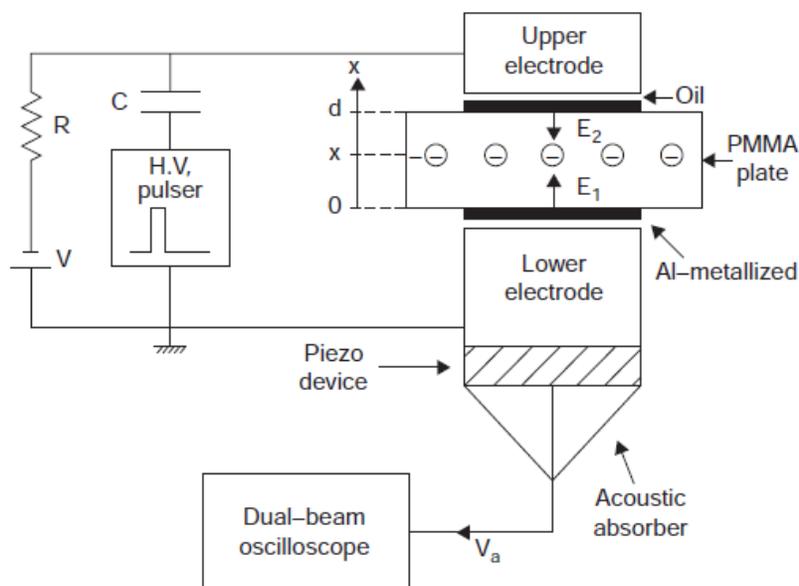


Figura 4.12

Diagramma a blocchi del metodo dell'impulso elettroacustico [1].

Inizialmente la sollecitazione utilizzata per eccitare le cariche era di tipo sinusoidale, ma questa non rendeva possibile visualizzare il profilo di carica spaziale nel dielettrico. Si è passati quindi all'utilizzo di un segnale impulsivo di breve valore e ampio in modulo.

Inizialmente la tecnologia permetteva di performare il test solamente su campioni di forma laminare. In seguito, una nuova famiglia di trasduttori piezoelettrici basati su film di polivinilidene fluoruro (PVDF) ha reso possibile applicare il metodo PEA anche su geometrie cilindriche; tali trasduttori presentano, infatti, un alto livello di piezoattività, un'ampia banda passante, una bassa impedenza acustica e sono fisicamente flessibili e modellabili e con un costo relativamente basso.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

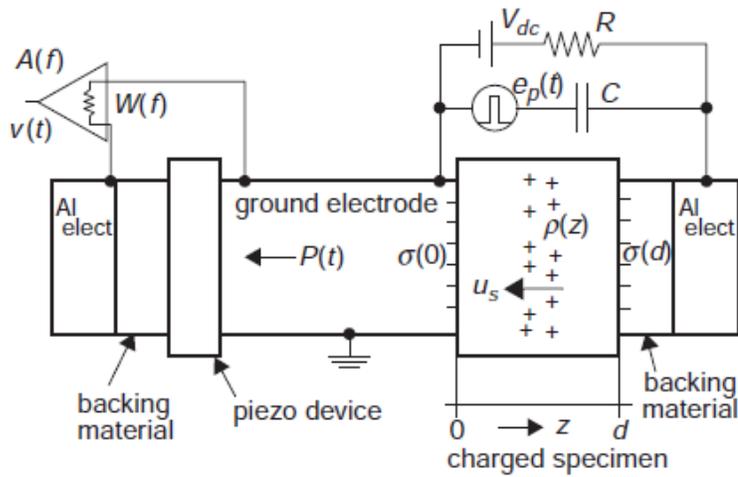


Figura 4.13
Schema del circuito del metodo PEA [1].

Nel tempo i sistemi per l'analisi di carica spaziale nei dielettrici sono stati sempre più migliorati fino al punto odierno in cui il loro utilizzo non è limitato alla sola ricerca per scopi accademici, ma anche per destinazioni di tipo industriale. In particolare questo tipo di misure sono fatte per valutare la qualità dei materiali e l'accoppiamento fra materiali diversi.

In particolare il PEA è il metodo di misura più vastamente diffuso e maggiormente sviluppato.

4.3 Aspetti teorici del metodo PEA

I concetti generali del funzionamento del metodo PEA verranno di seguito spiegati utilizzando una geometria piana dei provini e degli elettrodi. Va da sé che questa assunzione è una forte approssimazione rispetto alla situazione reale che si viene a formare nei cavi. Questo capitolo si impegna, però, a spiegare la fisica che è dietro al principio di funzionamento del sistema che sostanzialmente rimane invariata nel passaggio da una geometria all'altra. Tuttavia i risultati ottenuti in una geometria cilindrica non possono essere elaborati come i risultati ottenuti in una geometria piana, inoltre i pattern acquisiti differiscono per via della differente geometria.

Oltre all'aspetto di elaborazione dei dati vi è una differenza sostanziale anche nello schema di funzionamento del sistema. Quindi le Figure 4.12 e 4.13 possono essere considerate valide per il principio di funzionamento della generazione e propagazione dell'onda di pressione, ma non rispecchiano la reale configurazione utilizzata per i test di cui si parlerà.

Il metodo dell'impulso elettroacustico è una tecnica non distruttiva per la misura, in materiali isolanti solidi sottoposti ad una tensione, dell'evoluzione nel tempo della distribuzione unidimensionale della densità di carica netta. Le informazioni ottenute sono relative alla distribuzione della carica nella sola direzione perpendicolare agli elettrodi (che sarà, in seguito, indicata come direzione z), o nella direzione radiale considerando una geometria cilindrica; nelle altre due direzioni le grandezze interessate si suppongono essere costanti.

Questa tecnica, sviluppata in Giappone negli anni '80 dal Professor Takada, ha subito negli anni una notevole evoluzione ed attualmente si è affermata come una delle più utilizzate in questo tipo di ricerca.

Il principio su cui si basa la misura è piuttosto semplice. Un campione di materiale isolante viene posto tra due elettrodi, uno dei quali (solitamente quello esterno, B, che funge anche da elettrodo di terra) costituisce anche una linea di ritardo acustica a basse perdite, terminante con un trasduttore piezoelettrico come, ad esempio, il PVDF. L'elettrodo superiore, A, è quello a cui viene applicata la tensione e , nel caso dei cavi, è il conduttore, mentre nei provini piani è un elettrodo apposito posizionato sopra il dielettrico. Nel caso di provini piani l'impulso elettrico viene applicato al medesimo elettrodo a cui viene applicata tensione, nei cavi invece si applica l'impulso attraverso degli elettrodi posizionati attorno alla semiconduttiva del materiale (si sfrutta quindi la capacità del cavo per far sì che l'impulso vada ad interessare il materiale isolante); nel campione si genera un corrispondente impulso di campo elettrico $e_p(t)$. Si assume che tale impulso sia istantaneo in tutto il provino; infatti, dato lo spessore medio dei

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

campioni e considerando che la variazione di campo elettrico si propaga con una velocità pari a $c/\epsilon_r\mu_r$ (dove c è la velocità della luce nel vuoto, ϵ_r e μ_r sono rispettivamente la costante dielettrica e la permeabilità magnetica relativa del materiale), si ottengono, per i normali materiali utilizzati nelle prove, tempi estremamente brevi nell'ordine dei ps.

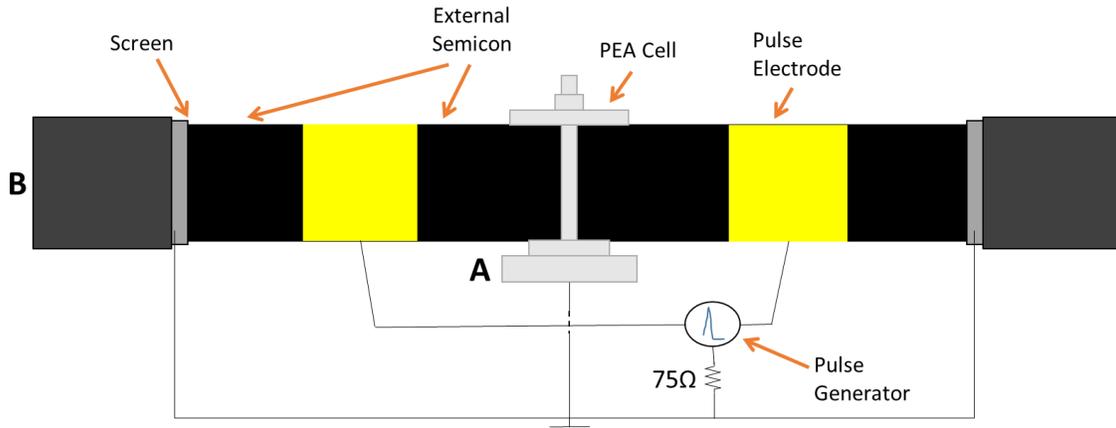


Figura 4.14
Schema del setup per la prova PEA su cavo.

Il campo elettrico impulsivo $e_p(t)$ esercita una forza, anch'essa impulsiva, sulla carica presente all'interno del provino; questa, per reazione, trasmette una pressione al materiale circostante generando un fronte d'onda che risulta direttamente proporzionale alla distribuzione di carica, una schematizzazione si vede in Figura 4.15.

Il profilo di pressione generato tende a propagarsi nel materiale come onda acustica dividendosi in due componenti che si propagano in entrambe le direzioni, raggiungendo entrambi gli elettrodi, mantenendo la forma del profilo originaria. Supponendo che la carica eccitata sia esattamente nel mezzo e che l'impedenza sonica sia uguale in entrambe le direzioni, allora le due onde di pressione che si propagano hanno la stessa ampiezza.

Le onde attraversano quindi tutto il materiale arrivando agli elettrodi. L'onda che attraversa l'elettrodo inferiore (elettrodo di terra) fino a giungere al trasduttore piezoelettrico dove viene trasformata in una tensione proporzionale e visualizzabile.

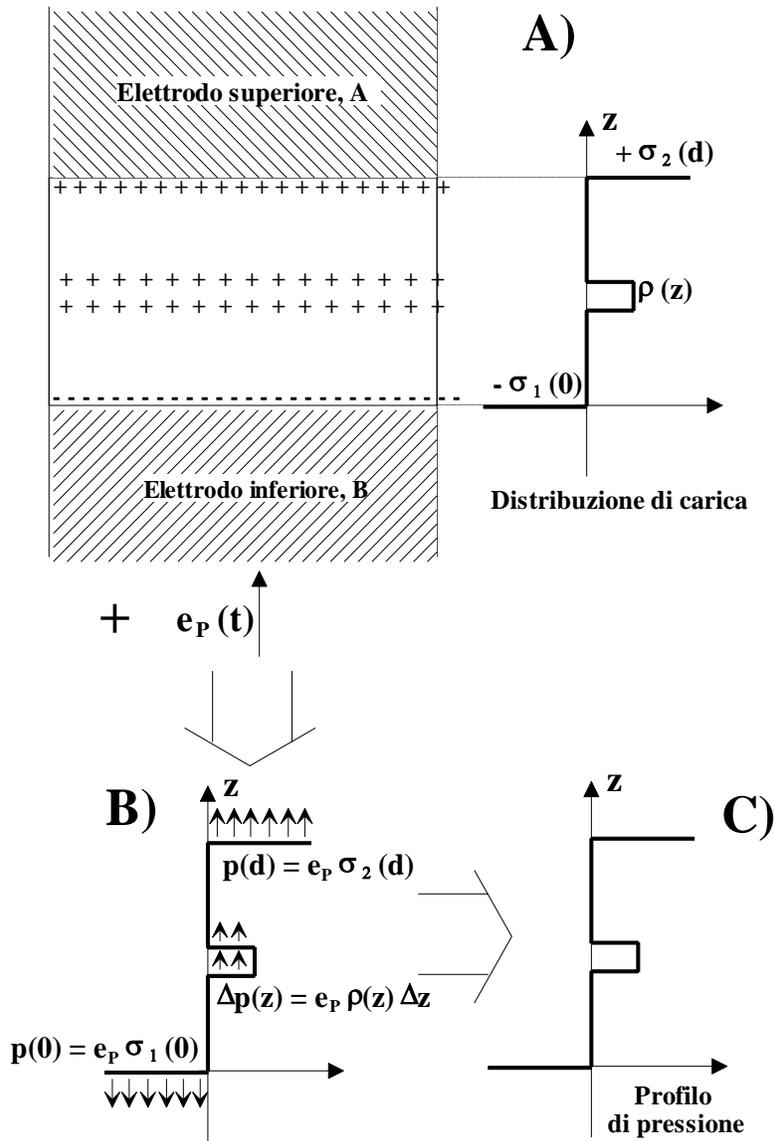


Figura 4.15

Schema di principio della formazione del profilo istantaneo di pressione a seguito dell'applicazione di un impulso di campo elettrico $e_p(t)$ tra gli elettrodi. A) Rappresentazione della distribuzione di carica all'interno del provino ($\rho(z)$ è la densità di carica, $\sigma_1(0)$ e $\sigma_2(d)$ sono le densità di carica superficiali agli elettrodi). B) Azione dell'impulso di campo che agendo sulle cariche dà origine ad uno sforzo meccanico, il quale provoca la nascita del profilo istantaneo di pressione, C) [2].

Il segnale viene quindi generato, amplificato, visualizzato e registrato mediante un oscilloscopio digitale. Il pattern di tensione ottenuta in funzione del tempo è una misura del profilo dell'onda di pressione, che è a sua volta proporzionale alla distribuzione unidimensionale della densità di carica netta nel campione.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

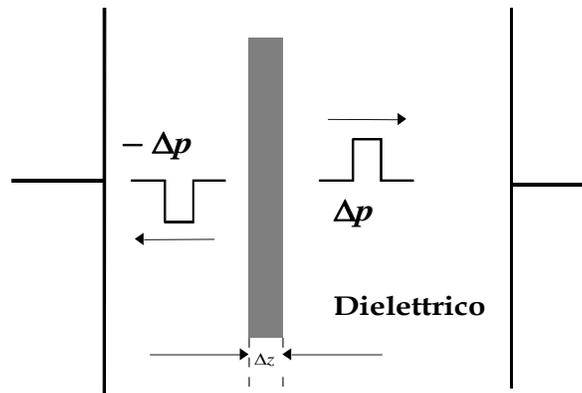


Figura 4.16

Propagazione delle due componenti dell'onda di pressione nelle due direzioni opposte. Una delle due componenti corrisponde ad una compressione mentre l'altra corrisponde ad una "tensione" del materiale [2].

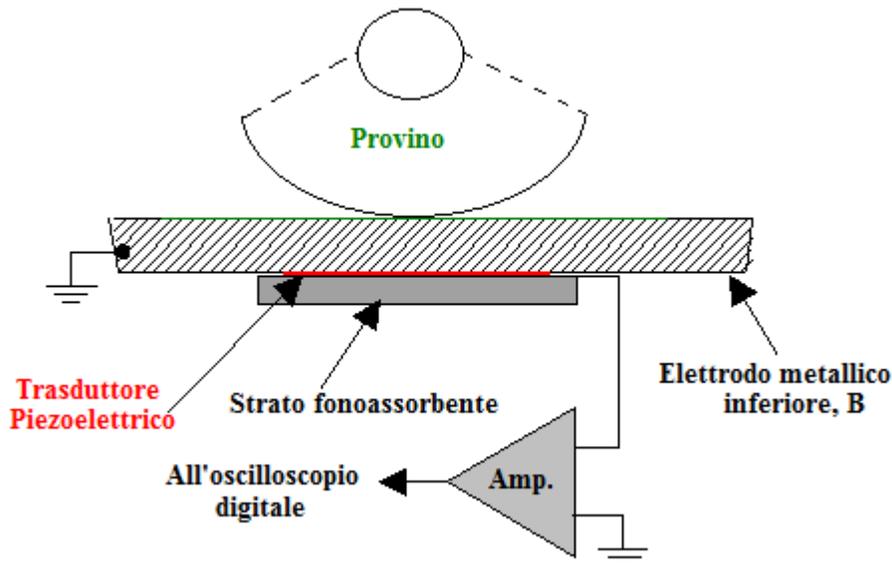


Figura 4.17

Schema della configurazione elettrodica e della dislocazione del trasduttore piezoelettrico in una cella PEA.

Nella Fig. 4.17 si può notare che al di sotto del trasduttore piezoelettrico è posto uno strato di materiale fonoassorbente. Questo strato impedisce l'eventuale riflessione dell'onda di pressione dopo l'attraversamento del piezoelettrico, che potrebbe introdurre dei disturbi nella generazione del segnale. Analogo scopo ha anche lo strato semiconduttivo posto tra il campione e l'elettrodo metallico superiore.

4.3.1 La formazione dell'onda acustica

La generazione dell'onda di pressione da parte di una carica inglobata nel materiale in seguito alla sollecitazione dell'impulso elettrico è un processo estremamente complesso che non è stato ancora chiarito sotto tutti i suoi aspetti. Assumendo una carica come intrappolata nel materiale (assunzione accettabile per la carica all'interno di un materiale isolante, in considerazione della sua bassa mobilità), essa può essere trattata classicamente come una particella in una buca parabolica locale di potenziale.

L'equazione del moto di una generica particella in una buca di potenziale, sollecitata da un campo elettrico Figura 4.18, è:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = -\frac{k(\theta - \xi)}{m} + \frac{E_z(t)q}{m} \quad (4.7)$$

dove θ è lo spostamento della carica nella direzione del campo elettrico applicato E_z (considerato parallelo all'asse z che genera una forza di Coulomb sulla carica come nell'equazione 4.9), ξ è la deformazione del materiale di permittività ϵ_r (sia θ sia ξ sono riferite alla posizione di equilibrio, Figura 4.18), m è la massa della carica intrappolata, q , e k è la costante di forza dovuta alla buca di potenziale (maggiore è la profondità della buca e maggiore è k).

La reazione alla forza di ristabilizzazione agisce sull'isolante che contiene la buca di potenziale. Per un materiale elastico, omogeneo ed isotropo l'equazione del moto in una dimensione è un'equazione d'onda con un termine forzante:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c_{SA}^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} + \frac{k(\theta - \xi)N(z)}{D} \quad (4.8)$$

$$\Delta \mathbf{F} = q \Delta \mathbf{E} \quad (4.9)$$

Dove c_{SA} è la velocità del suono nel materiale, $N(z)$ è la densità di carica intrappolata e D è la densità del materiale.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

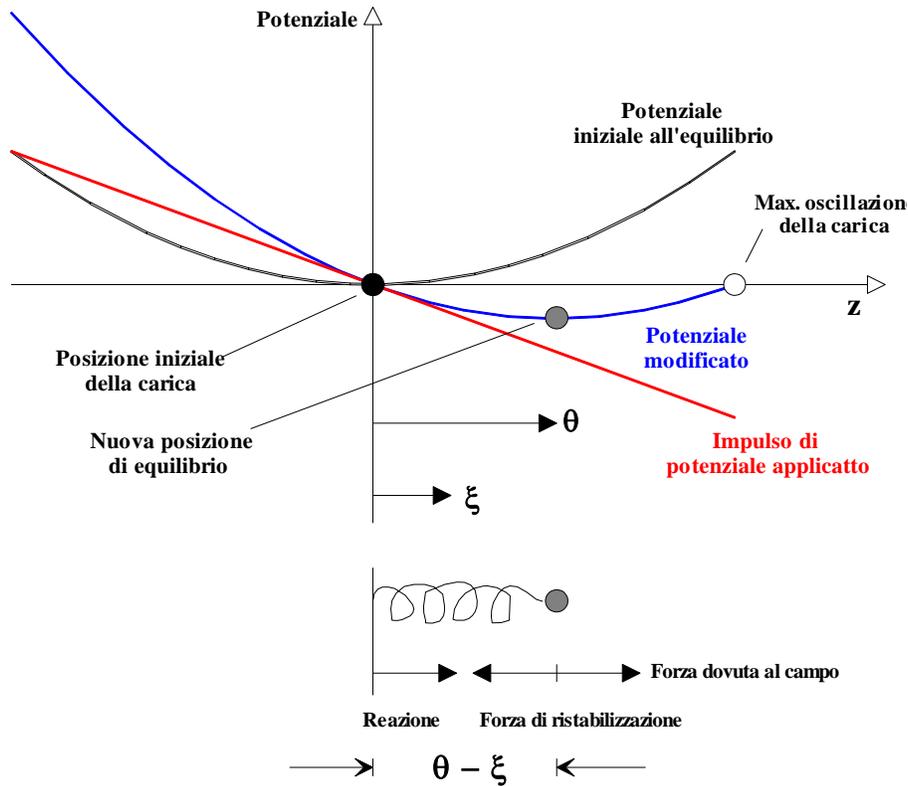


Figura 4.18

Diagramma schematico che mostra una carica intrappolata (particella nera) posizionata sul fondo della buca di potenziale parabolica locale. L'impulso del campo elettrico applicato è un gradiente di potenziale lineare che modifica l'andamento del potenziale. La carica oscilla attorno al centro del potenziale modificato e la reazione alla forza di ristabilizzazione media è uguale alla forza dovuta al campo [2].

La forza, $T(z, t)$, che si genera nel materiale (e provoca l'onda di pressione) è una funzione della deformazione ξ e, in accordo con la legge di Hooke, è data da:

$$T(z, t) = -Y \frac{\partial \xi(z, t)}{\partial t} \quad (4.10)$$

Dove Y è il modulo di Young.

L'equazione dell'onda acustica (o onda di pressione) nel materiale può essere calcolata, in termini di deformazione o in termini di forza, utilizzando le equazioni 4.7 e 4.10. In linea di principio una soluzione analitica di questo problema potrebbe essere ottenuta, mediante le suddette equazioni, per un qualunque impulso di campo applicato e per una qualunque distribuzione di carica.

Simulazioni effettuate a partire dalle equazioni appena descritte hanno mostrato che il profilo di pressione che si genera nel materiale è composto da due componenti: la principale che ricalca l'andamento della carica ed una secondaria oscillante sovrapposta alla prima. Quest'ultima componente è dovuta all'oscillazione della carica sul fondo della buca di potenziale modificata Figura 4.18 e la sua importanza dipende dal rapporto fra il tempo di oscillazione attorno al punto di equilibrio e la durata dell'impulso elettrico forzante. In realtà, si è però osservato che, essendo la frequenza di oscillazione molto alta, questa componente è filtrata dal sistema, che funge appunto da filtro passa basso.

La soluzione analitica delle equazioni 4.7 e 4.8 conferma che l'onda di pressione $T(z,t)$ consiste di due componenti che si propagano in direzioni opposte con velocità c_{SA} . Per un dato tempo t , il profilo di entrambe le componenti segue quello della distribuzione di carica originale $\rho(z)$ spostata di una distanza. L'ampiezza delle due componenti è pari alla metà dell'ampiezza del profilo di pressione originario.

4.3.2 Propagazione dell'onda di pressione

Si consideri un campione di materiale isolante di spessore d sollecitato da una tensione continua VDC. Se all'interno del materiale esiste una distribuzione di carica spaziale la carica superficiale indotta sugli elettrodi σ_1 e σ_2 è la somma di due componenti: la carica indotta dal campo laplaciano V_{DC}/d e quella indotta dalla carica spaziale; come si vede in Figura 4.19.

Si ha quindi:

$$\sigma_1 = \varepsilon E_{DC} - \int_0^d \frac{d-z}{d} \rho(z) dz \quad (4.11)$$

$$\sigma_1 = \varepsilon E_{DC} - \int_0^d \frac{z}{d} \rho(z) dz \quad (4.12)$$

Dove E_{DC} è il campo elettrico laplaciano applicato, ε è la costante dielettrica del materiale indeformato (cioè in assenza di impulso di campo elettrico) e $\rho(z)$ è la distribuzione di carica spaziale.

La presenza di una carica spaziale non nulla comporta anche la deformazione del campo elettrico che non sarà più costante all'interno del materiale E_{DC} , ma sarà una funzione della coordinata z , legata alla distribuzione $\rho(z)$ mediante l'equazione di Poisson:

$$\frac{dE(z)}{dz} = \frac{\rho(z)}{\varepsilon} \quad (4.13)$$

Dove tutte le grandezze hanno il significato precedentemente introdotto.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

Il valore del campo elettrico agli elettrodi A e B, E_2 ed E_1 Figura 4.19, può essere calcolato mediante le densità di carica σ_1 e σ_2 sfruttando le relazioni:

$$\sigma_1 = \varepsilon E_1 \quad (4.14a)$$

$$\sigma_2 = -\varepsilon E_2 \quad (4.14b)$$

Con riferimento alla Fig. 3.11, le forze per unità di superficie esercitate dal campo elettrico sulle cariche presenti nel campione, comprese quelle superficiali sugli elettrodi, possono essere espresse dalle relazioni:

$$f_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 E_1 = \frac{1}{2} \varepsilon E_1^2 \quad (4.15a)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \sigma_2 E_2 = \frac{1}{2} \varepsilon E_2^2 \quad (4.15b)$$

$$\Delta f_3(z) = \rho(z) \Delta z E(z) \quad (4.15c)$$

Dove $\Delta f_3(z)$ è la forza agente su di un sottile strato Δz di carica spaziale $\rho(z)$ nella generica posizione z .

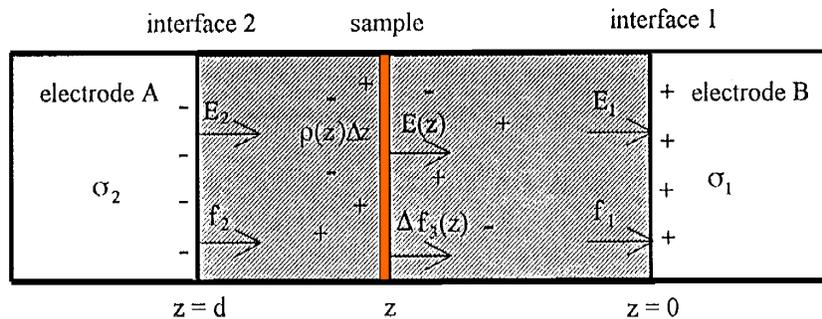


Figura 4.18

Rappresentazione schematica del campione posizionato tra i due elettrodi. Nella figura sono evidenziate le forze f_1 , f_2 e $\Delta f_3(z)$ agenti sulle cariche superficiali e su uno strato di carica elettrica all'interno del campione [2].

L'applicazione dell'impulso di campo elettrico $e_p(t)$, di durata Δt , provocando la temporanea deformazione (costante in tutto il campione) del campo elettrico, induce una variazione temporanea anche nelle forze applicate alle cariche.

Il campo agente sulle cariche può essere espresso dalla relazione:

$$E(z, t) = E(z) + e(t) \quad (4.16)$$

Dove il campo elettrico risultante, funzione del tempo e della posizione, è dato dalla somma di un termine dipendente solo dalla posizione (il campo poissoniano) e da un termine dipendente solo dal tempo (il campo legato all'impulso di tensione).

In generale si assume che la distribuzione di carica elettrica non sia influenzata dall'impulso di campo elettrico applicato al campione. L'impulso dà luogo, infatti, ad una componente di campo elettrico di ordini di grandezza inferiore rispetto a quella dovuta alla tensione continua applicata.

In queste condizioni, sostituendo la 4,16 nelle 4.15 è possibile ottenere le forze agenti sulle cariche al tempo $t=0$ in cui si suppone applicato l'impulso. Trascurando la componente dovuta al campo elettrico poissoniano, la quale, essendo una condizione di regime, non fornisce contributo al segnale di pressione utile per il PEA, si ottiene che la forza conseguente all'impulso $e_P(t)$ è data da:

$$f_1(t) = \sigma_1 e_P(t) + \frac{1}{2} \epsilon e_P^2(t) \quad (4.17a)$$

$$f_1(t) = \sigma_2 e_P(t) - \frac{1}{2} \epsilon e_P^2(t) \quad (4.17b)$$

$$\Delta f_3(z, t) = \rho(z) \Delta z e_P(t) \quad (4.17c)$$

Come descritto nel paragrafo precedente l'azione delle forze $f_1(t)$, $f_2(t)$ e $\Delta f_3(z, t)$ causa un leggero spostamento delle cariche superficiali σ_1 , σ_2 e della carica spaziale $\rho(z)$ che è all'origine della propagazione dell'onda acustica. Quest'ultima è costituita da due componenti, aventi la medesima forma dell'impulso e ampiezza dimezzata, che si propagano in direzioni opposte con velocità, c_{SA} dipendente dal mezzo.

Con riferimento alla Figura 4.19 e prendendo in considerazione il solito strato di carica in posizione generica, la componente dell'onda di pressione che si propaga verso la posizione $z=0$, cioè verso l'elettrodo inferiore oltre il quale è posizionato il trasduttore, è data da:

$$\Delta p_3(z, t) = \frac{1}{2} \rho(z) \Delta z e_P \left(t - \frac{z}{c_{SA}} \right) \quad (4.18)$$

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

Ponendo $z = c_{SA}\tau$ (dove c_{SA} è la velocità di propagazione dell'onda di pressione nel mezzo, considerata costante e $\tau = z/c_{SA}$ è, quindi, il tempo necessario alla componente dell'onda acustica che si propaga da una generica posizione z per raggiungere la posizione $z = 0$) si può scrivere:

$$\rho(z) = \rho(c_{SA}\tau) = r(\tau) \quad (4.19)$$

Conseguentemente, l'onda acustica risultante, dovuta a tutta la densità di carica interna $r(\tau)$, è espressa come:

$$p_3(t) = \frac{1}{2} c_{SA} \int_0^t r(\tau) e_p(t - \tau) d\tau \quad (4.20)$$

L'equazione 4.20 è l'integrale delle onde impulsive che raggiungono la posizione $z = 0$ al rispettivo tempo τ ; quanto qui descritto è rappresentato in Figura 4.19.

Come mostrato in Figura 4.19 all'onda acustica $p_3(t)$, dovuta alla distribuzione interna di carica, si sommano le due onde acustiche $p_1(t)$ e $p_2(t)$ dovute alle cariche superficiali σ_1 e σ_2 che saranno meglio definite in seguito. L'onda acustica totale $p(t)$ può, quindi, essere espressa come somma dei diversi componenti acustici appena definiti, la cosa è maggiormente comprensibile dal grafico in Figura 4.19.

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) \quad (4.21)$$

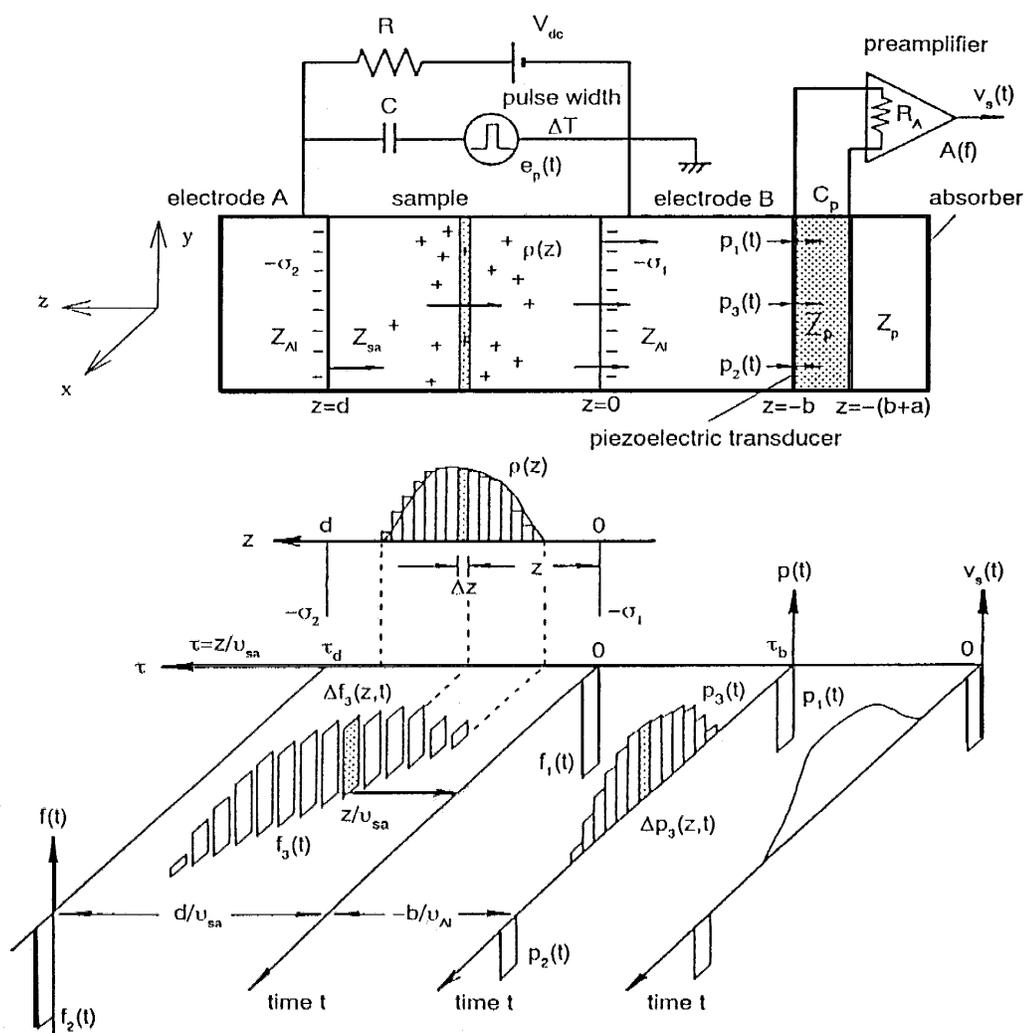


Figura 4.19

Schema della formazione e della propagazione dell'onda di pressione. Il digramma mostra: la distribuzione di carica elettrica $\rho(z)$ all'interno del campione, la forza $f(t)$ indotta dall'impulso di campo elettrico sulla carica, l'onda acustica $p(t)$ trasmessa attraverso il materiale e l'elettrodo B ed il segnale di tensione in uscita $V_s(t)$ [2].

L'onda acustica $p(t)$ per arrivare al trasduttore piezoelettrico deve propagarsi attraverso l'elettrodo B e, soprattutto, attraverso le due interfacce campione-elettrodo B ed elettrodo B-trasduttore come si vede nelle Figure 4.19 e 2.20.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

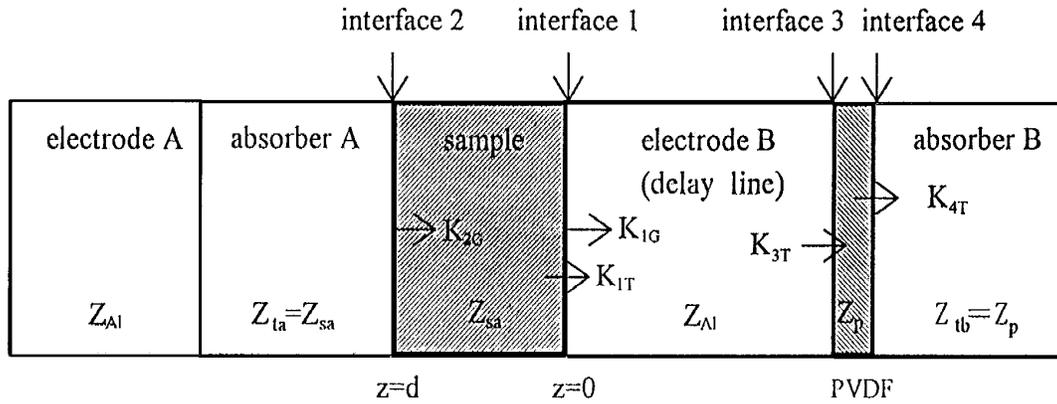


Figura 4.20

Schematizzazione della cella PEA in termini di impedenza acustica. K_{1G} , K_{2G} , K_{1T} , K_{3T} e K_{4T} sono i coefficienti di trasmissione acustica; Z_{ta} è l'impedenza acustica dello strato fonoassorbente A (semiconduttivo), Z_{sa} è l'impedenza acustica del campione, Z_{A1} è l'impedenza acustica della linea di ritardo (elettrodo B in alluminio), Z_T è l'impedenza acustica del trasduttore e Z_{tb} è l'impedenza acustica dello strato fonoassorbente B.

Quando l'onda acustica si propaga attraverso queste interfacce è parzialmente trasmessa e parzialmente riflessa. Scegliendo in modo appropriato la lunghezza della linea di ritardo (cioè lo spessore dell'elettrodo B) si fa in modo che le riflessioni multiple dovute alle interfacce non costituiscano un disturbo sul segnale rilevato dal trasduttore (la linea di ritardo deve essere sufficientemente lunga per separare il profilo dell'onda acustica trasmessa inizialmente da ogni sua residua riflessione). Questo aspetto di progettazione della cella risulterà fondamentale per i risultati ottenuti nelle prove su cavi full size nel Capitolo 8. Con riferimento alla Figura 4.20 e all'equazione 4.20 si può esprimere l'onda acustica relativa alla carica interna incidente sul trasduttore come:

$$p_3(t) = \frac{1}{2} K_{1T} K_{3T} c_{SA} \int_0^t r(\tau) e_p(t - \tau - \tau_b) d\tau \quad (4.22a)$$

Dove $\tau_d = d/c_{SA}$ è il tempo di transito dell'onda acustica attraverso tutto il campione, mentre K_{1G} e K_{2G} sono i coefficienti di propagazione, nella direzione del trasduttore, delle onde acustiche formatesi agli elettrodi. I coefficienti di propagazione sono definiti in Tabella 4.1.

Prendendo in considerazione i rispettivi coefficienti di trasmissione acustica Figura 4.20, le due componenti dell'onda di pressione relative alle cariche sugli elettrodi Figura 4.19 possono essere espresse come:

$$p_1(t) = K_{1G}K_{3T}[\sigma_1 e_p(t - \tau_b) + \varepsilon e_p^2(t - \tau_b)] \quad (4.22b)$$

$$p_2(t) = K_{2G}K_{1T}K_{3T}[\sigma_2 e_p(t - \tau_b - \tau_d) + \varepsilon e_p^2(t - \tau_b - \tau_d)] \quad (4.22c)$$

Dove $\tau_d = d/c_{SA}$ è il tempo di transito dell'onda acustica attraverso tutto il campione e K_{1G} e K_{2G} sono i coefficienti di propagazione, nella direzione del trasduttore, delle onde acustiche formatesi agli elettrodi, definiti in Tab. 3.1.

Tabella 4.1

Definizione dei coefficienti di trasmissione acustica in termini di impedenza acustica Z dei diversi elementi in gioco apprezzabili nella Figura 4.20.

Coefficiente di Trasmissione Acustica
$K_{1G} = Z_{A1} / (Z_{A1}/Z_{sa})$
$K_{2G} = Z_{sa} / (Z_{sa}/Z_{ta})$
$K_{1T} = 2Z_{A1} / (Z_{A1}/Z_{sa})$
$K_{3T} = 2Z_p / (Z_{A1}/Z_p)$
$K_{4T} = 2Z_{tb} / (Z_{A1}/Z_p)$

L'impedenza acustica per un dato materiale è definita dal prodotto tra la sua densità e la rispettiva velocità di propagazione del suono.

L'onda acustica totale $p(t)$ incidente sul trasduttore Figura 4.20 può, quindi, essere espressa come somma dei diversi componenti acustici.

La Figura 4.20 mette in evidenza i due strati attenuatori (absorber) utilizzati nel circuito. L'absorber B è posizionato "a valle" del trasduttore piezoelettrico per eliminare le riflessioni delle onde acustiche all'uscita dal trasduttore; per questa ragione viene scelto un materiale che presenti un'impedenza acustica simile a quella del trasduttore (spesso si usa lo stesso materiale). L'absorber A è adottato per evitare un'eventuale riflessione della componente dell'onda di pressione propagatasi verso l'interfaccia con l'elettrodo A; per questo motivo si sceglie un materiale avente le stesse caratteristiche del materiale in esame (dovendo essere anche un materiale conduttore la scelta ricade su di uno strato

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

semiconduttivo). Mentre nei provini piani o di laboratorio questo strato viene inserito artificialmente, nei cavi si utilizza la natura costruttiva del cavo e, quindi, il semiconduttivo interno.

Da quanto appena detto e osservando le definizioni dei coefficienti di trasmissione acustica riportati in Tabella 4.1, si possono trarre le conclusioni riportate in Tabella 4.2.

Tabella 4.2

Valori dei coefficienti di impedenza acustica dopo le considerazioni fatte sulla tecnica costruttiva della cella.

Coefficiente di Trasmissione Acustica
$K_{1G} = K_{1T} / 2$
$K_{2G} = 1 / 2$
$K_{1T} = 2Z_{A1} / (Z_{A1}/Z_{sa})$
$K_{3T} = 2Z_p / (Z_{A1}/Z_p)$
$K_{4T} = 1$

Confrontando quanto riportato in Tab. 3.2 con i coefficienti delle (3.18) si può osservare che tutte le espressioni sono riconducibili al medesimo coefficiente: $K_{1T} K_{3T} / 2$.

Questo significa che, a partire dal profilo iniziale di pressione, l'onda acustica che si propaga nella direzione del trasduttore subisce la stessa attenuazione qualunque sia il punto in cui si origina (ovviamente questo vale non considerando l'attenuazione e la deformazione introdotta nell'attraversamento del materiale stesso, ma prendendo in considerazione solo le interfacce).

Sulla base di quanto detto, la relazione 4.21 può essere esplicitata nella seguente forma:

$$p(t) = \frac{1}{2} K_{1T} K_{3T} \left[\sigma_1 e_p(t - \tau_b) + \sigma_2 e_p(t - \tau_b - \tau_d) + c_{SA} \int_0^t r(\tau) e_p(t - \tau - \tau_b) d\tau \right] \quad (4.23)$$

Dove i termini contenenti $e_p^2(t)$, presenti nelle 4.22b e 4.22c, sono stati trascurati perché molto inferiore agli altri addendi presenti.

Questa onda di pressione, sollecitando il piezoelettrico, produce un segnale di tensione ad essa proporzionale.

4.3.2 Segnale di uscita dal trasduttore piezoelettrico

La piezoelettricità è la proprietà di alcune sostanze cristalline di manifestare una separazione di carica (che si accumula sulle due superfici opposte) quando vengono sottoposte a deformazione elastica.

Quando l'onda acustica $p(t)$ descritta dalla 4.23 si propaga attraverso il trasduttore, sulla superficie di quest'ultimo è indotta, per effetto piezoelettrico, una carica $q(t)$. Si può esprimere approssimativamente questa carica come:

$$q(t) = d_c p(t) S \quad (4.24)$$

Si ha d_c è la costante piezoelettrica di sforzo e S è l'area del trasduttore. La differenza di potenziale elettrico tra le due superfici del trasduttore è quindi:

$$v_{PVDF}(t) = \frac{q(t)}{C_P} \quad (4.25)$$

$$C_P = \varepsilon_{PVDF} \frac{S}{a} \quad (4.25)$$

Dove C_P è la capacità statica del trasduttore, con a corrispondente allo spessore del trasduttore e ε_{PVDF} costante dielettrica del piezoelettrico (PVDF deriva dal nome del trasduttore abitualmente utilizzato nei sistemi PEA).

Sostituendo l'equazione 4.24 nella 4.25 si ottiene:

$$v_{PVDF}(t) = \frac{d_c a}{\varepsilon_{PVDF}} p(t) \quad (4.26)$$

Come si può osservare dall'equazione sopra riportata, il segnale elettrico generato dall'onda acustica $p(t)$ è dipendente dallo spessore ed indipendente dall'area del trasduttore (supponendo, ovviamente, che tutta la superficie del trasduttore sia interessata dall'onda di pressione).

La risposta all'impulso $h(t)$ del trasduttore, cioè la sua funzione di trasferimento, è definita come un singolo impulso rettangolare:

$$g = dc \frac{a}{\varepsilon_{PVDF}} \Delta\tau \quad \longrightarrow \quad h(t) = g[u(t) - u(t - \Delta\tau)] \quad (4.27)$$

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

Dove $u(t)$ è la funzione gradino e $\Delta\tau = a / c_p$ (con c_p velocità acustica nel trasduttore) è il tempo di transito dell'onda acustica attraverso il trasduttore.

Il segnale di tensione in uscita dal trasduttore è quindi dato dalla convoluzione dell'onda acustica $p(t)$ con la funzione di trasferimento $h(t)$, espressa dalla seguente equazione:

$$v_{PVDF}(t) = \int_0^t h(t')p(t - t')dt' \quad (4.28)$$

Se il tempo di transito dell'onda $\Delta\tau$ acustica attraverso il trasduttore è molto piccolo rispetto alla più breve onda acustica, allora la funzione di trasferimento può essere considerata una funzione di Dirac e si può semplificare lo studio utilizzando l'equazione 4.26 al posto della 4.28.

4.3.3 Il sistema di amplificazione del segnale

Il segnale di uscita dal trasduttore $v_{PVDF}(t)$ è generalmente di ampiezza estremamente bassa e per questo motivo viene amplificato mediante uno stadio di amplificazione a basso disturbo caratterizzato da un'ampia banda di ingresso.

Il collegamento piezoelettrico-amplificatore può essere rappresentato da un circuito RC la cui costante di tempo è data dal prodotto tra la capacità statica del trasduttore C_P e la resistenza di ingresso del primo stadio di amplificazione R_I . La funzione di trasferimento che ne consegue è espressa da:

$$w(f) = \frac{j2\pi f C_P R_I}{1 + j2\pi f C_P R_I} \quad (4.29)$$

Dove f è la frequenza. Il circuito RC, piezo-amplificatore, agisce come un filtro passa alto la cui frequenza di taglio è -3dB. Quest'ultima è ottenuta da:

$$f_T = \frac{1}{2\pi C_P R_I} \quad (4.30)$$

Considerando un trasduttore piezoelettrico in PVDF avente uno spessore di 9 μm e un diametro di 15 mm, la capacità statica risulta di circa 7 nF. Assumendo la resistenza di ingresso dell'amplificatore pari a 1 M Ω , si ricava che f_T è dell'ordine delle decine di Hz. Per un trasduttore analogo ma con spessore 52 μm e diametro 30mm, la capacità statica diventa circa 2nF; considerando sempre una resistenza di ingresso di 1 M Ω si ricava che f_T è dell'ordine del centinaio di Hz.

Il tempo di transito dell'onda acustica attraverso un campione di XLPE con spessore pari a 100 μm è di circa 50 ns; la più bassa componente di frequenza dell'onda acustica è, quindi, circa 20 MHz. Poiché f_T risulta in genere molto inferiore a tale valore, si può concludere che il sistema piezo-amplificatore è in grado di trasmettere l'onda acustica.

Il segnale $v_s(t)$ in uscita dal sistema di amplificazione è quindi dato dalla relazione:

$$v_s(t) = W G v_{PVDF}(t) = W G \frac{d_c a}{\epsilon_{PVDF}} p(t) \quad (4.31)$$

Dove G è il guadagno del sistema di amplificazione e W è la funzione di trasferimento del circuito piezo-amplificatore precedentemente definita. Il prodotto WG si può ritenere costante nella banda di frequenza corrispondente ai componenti armonici di $p(t)$.

Nell'equazione 4.31 si è assunta valida, per semplicità, la 4.26 che a rigore vale solo nel caso di un trasduttore ideale. L'espressione generale è, comunque, facilmente ricavabile sostituendo nella 4.31 l'espressione per $v_{PVDF}(t)$ data dalla 4.28.

Dalle relazioni 4.23 e 4.31 si può quindi concludere che il segnale di uscita dal sistema di amplificazione è direttamente proporzionale ai profili di carica spaziale e cariche superficiali presenti nel campione. Questo è, sostanzialmente, il principio su cui si basa il metodo PEA.

4.3.4 Deconvoluzione e calibrazione del segnale

A causa delle limitazioni intrinseche dei diversi componenti che costituiscono il sistema, il segnale in uscita dallo stadio di amplificazione sarà sempre più o meno distorto rispetto alla reale distribuzione di carica. Tra le cause di questa distorsione vale la pena ricordare che l'impulso elettrico di sollecitazione ha una durata breve ma non nulla e che gli amplificatori non sono ideali, in altre parole, che l'ampiezza della loro banda di frequenza non è infinita.

Ipotizzando, ad esempio, che il segnale in ingresso al sistema trasduttore-amplificatore sia un'onda quadra, quest'ultima sarà generalmente deformata come riportato in Figura 4.21, dove è rappresentata la tipica deformazione introdotta da un filtro passa alto quale è l'accoppiamento trasduttore-amplificatore. Per eliminare questa deformazione viene solitamente utilizzato un processo di deconvoluzione numerica che, nota la funzione di trasferimento WG , permette di ricostruire il segnale reale in ingresso al sistema trasduttore-amplificatore.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

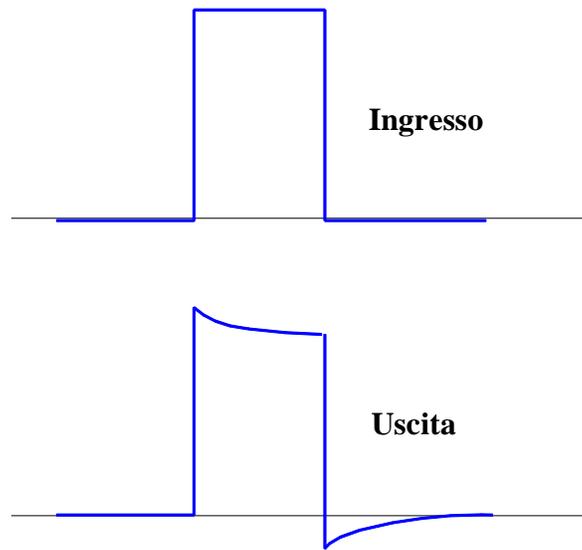


Figura 4.21

Deformazione dell'onda quadra dovuta all'accoppiamento piezoelettrico-trasduttore [2].

Ottenuto il segnale di tensione $v_S(t)$ a partire dalla distribuzione di carica $r(\tau)$ nel modo precedentemente descritto (il legame tra $v_S(t)$ e $r(\tau)$ è dato dalle relazioni 4.31 e 4.23) e dopo averlo eventualmente deconvoluto per eliminare la deformazione introdotta dal sistema trasduttore-amplificatore, è necessario, per ottenere informazioni quantitative, ritrasformarlo in una densità di carica funzione della posizione nel campione. Si deve, cioè, calibrare il sistema Schema 4.1.

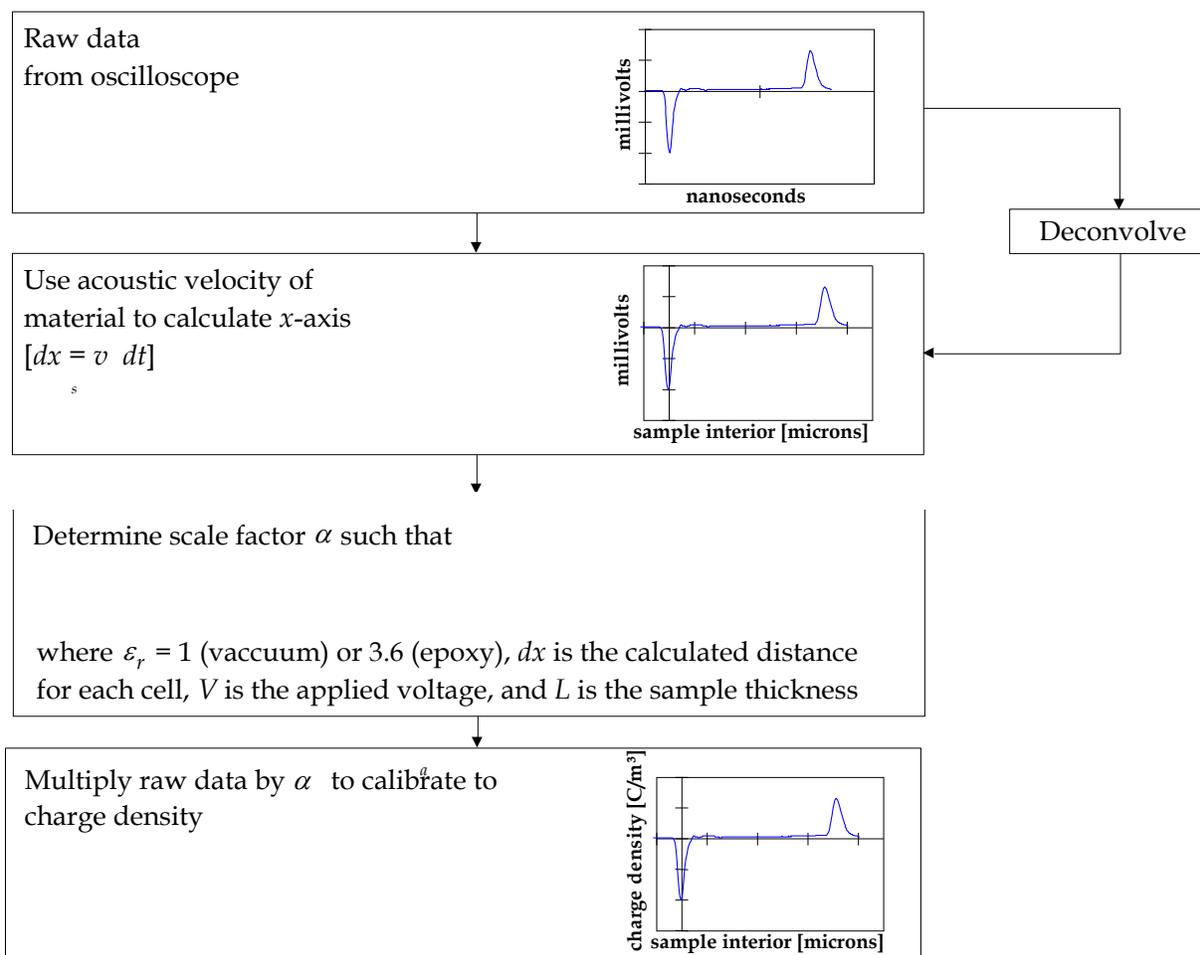
Per fare questo esistono molti metodi, ma fondamentale occorre ottenere una costante, detta appunto costante di calibrazione, che permetta di passare dai mV del segnale $v_S(t)$, ai C/m^3 della distribuzione di carica spaziale $r(\tau)$.

Relativamente all'asse delle ascisse, la soluzione del problema è molto semplice: nota la velocità di propagazione dell'onda di pressione nel materiale, c_{SA} basta moltiplicare i tempi per questa velocità per ottenere la posizione nel provino Schema 4.1.

A questo proposito è bene osservare che il primo picco che appare nella forma d'onda funzione del tempo nello Schema 4.1 corrisponde alla carica sull'elettrodo B (il più vicino al trasduttore), mentre l'ultimo corrisponde alla carica sull'elettrodo A (il più lontano dal trasduttore). La distanza fra i due picchi corrisponde allo spessore del provino. Ciò consente di verificare, noto lo spessore reale, la velocità c_{SA} utilizzata per i calcoli.

Si noti che il secondo picco (quello corrispondente all'elettrodo A) al contrario del primo (generato sull'elettrodo B) deve attraversare tutto il campione prima di raggiungere la linea di ritardo a basse

perdite costituita dall'elettrodo B. Per questo motivo esso appare più deformato (più basso e largo): esso subisce, infatti, delle “perdite” nell'attraversamento del materiale. In seguito questo problema sarà trattato più dettagliatamente.



Schema 4.1

Schema di principio della calibrazione [2]

4.3.5 Effetto dello spessore del trasduttore e della durata dell'impulso

In letteratura sono riportate delle interessanti simulazioni che mostrano efficacemente l'effetto della durata dell'impulso elettrico e dello spessore del trasduttore sul segnale di uscita [7].

Nella Figura 4.22, ad esempio, sono riportati i risultati di una di queste simulazioni. Nella figura (a) è riportata la distribuzione di carica utilizzata per la simulazione. In essa è supposto che la carica spaziale sia allocata in posizione centrale nel dielettrico e che questa induca sugli elettrodi le cariche superficiali σ_1 e σ_2 (si considera nulla la tensione applicata). Nel caso specifico è stato preso in

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

considerazione uno spessore del campione tale per cui il tempo T impiegato dall'onda di pressione per attraversarlo completamente (da un elettrodo all'altro) risulta di 1200 ns.

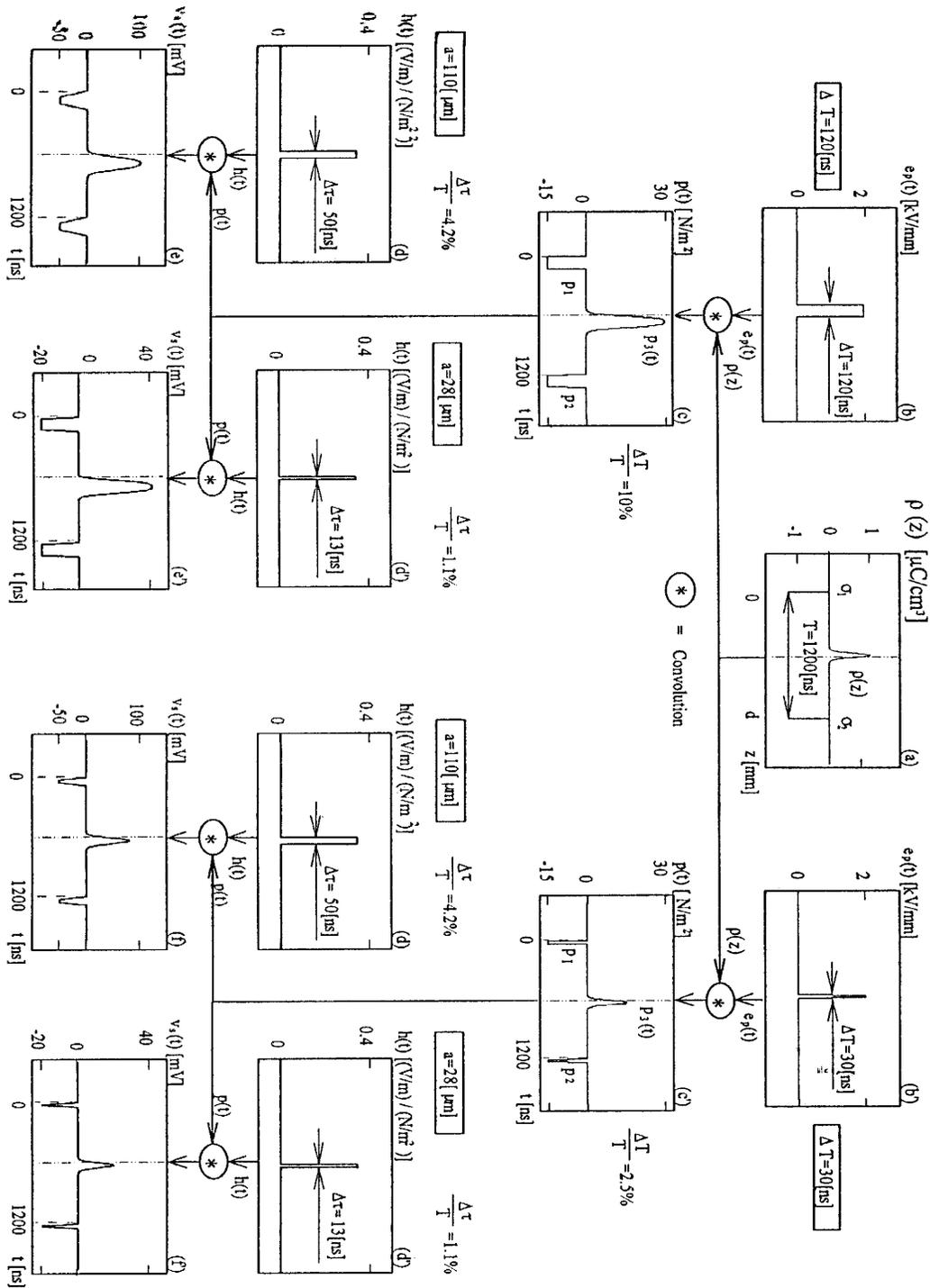


Figura 4.22

Simulazione del metodo dell'impulso elettroacustico con carica spaziale disposta centralmente nel dielettrico [7].

Combinando questa distribuzione con due diversi impulsi elettrici $e_p(t)$, schematizzati nelle figure (b) e (b'), idealmente supposti perfettamente rettangolari e di durata ΔT , rispettivamente pari a 120 ns e 30 ns, si ottiene il profilo di pressione $p(t)$ che si genererebbe all'interno del materiale. Le figure (c) e (c') riportano gli andamenti di pressione relativi ai due diversi impulsi. Confrontando tali figure si può osservare che i due impulsi elettrici danno origine ad impulsi di pressione relativi alle cariche superficiali sugli elettrodi, p_1 e p_2 , aventi profilo rettangolare di pari ampiezza ma con larghezze proporzionali alla rispettiva durata ΔT . L'impulso di pressione $p_3(t)$, legato alla carica spaziale disposta centralmente, invece, ha una maggior ampiezza nel caso in cui la durata dell'impulso di campo elettrico è di 120ns, rispetto al caso in cui è 30ns. Nel primo caso, per contro, si nota un maggiore spostamento del picco rispetto alla posizione centrale reale.

Nelle figure (d) e (d') sono riportate le funzioni di trasferimento teoriche $h(t)$ di due trasduttori aventi spessore rispettivamente di 110 μ m e di 28 μ m. Combinando tali andamenti con quelli dell'onda di pressione $p(t)$ si ottiene la tensione di uscita $v_s(t)$ (si assume in questo caso nulla qualunque distorsione dovuta alla non idealità dello stadio di amplificazione o al transito dell'onda nel materiale) che rappresenta il segnale utile del PEA. Combinando i due impulsi elettrici e i due spessori di trasduttore si ottengono quattro possibili segnali: (e), (e'), (f) ed (f').

Confrontando le quattro figure così ottenute con la distribuzione originaria di carica (a), si osserva che il risultato migliore, relativamente alla proporzionalità tra segnale di uscita e andamento della carica, è quello del caso in cui all'impulso di durata minore è accoppiato il trasduttore di spessore minore (f').

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

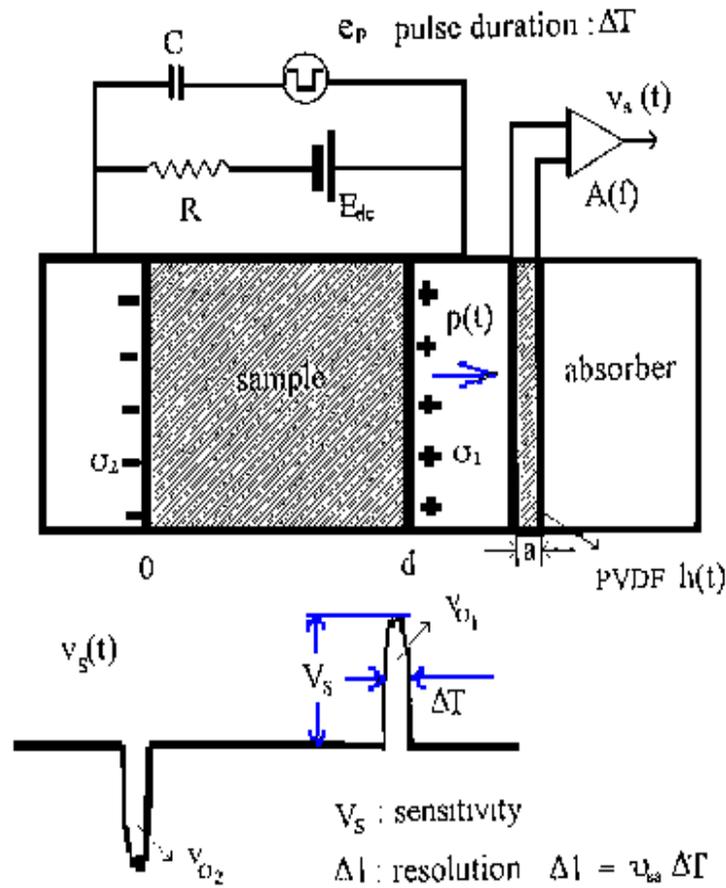


Figura 4.23

Schema rappresentativo dell'apparato cella-campione e del relativo segnale d'uscita [2].

La simulazione appena riportata mostra che la distorsione del segnale misurato, rispetto al reale profilo di carica spaziale, aumenta all'aumentare della durata dell'impulso elettrico e dello spessore del trasduttore utilizzati. Per contro, osservando l'ampiezza del segnale di uscita nei diversi casi proposti, è immediato rendersi conto che esso aumenta di intensità aumentando la durata dell'impulso e lo spessore del trasduttore.

Generalmente nei sistemi PEA si definisce la *sensibilità* come l'ampiezza V_s in mV del segnale di uscita $v_s(t)$. Mentre la *risoluzione spaziale* Δl come:

$$\Delta l = c_{SA} \Delta T \quad (4.32)$$

dove ΔT è la durata dell'impulso elettrico (misurata in corrispondenza della metà dell'ampiezza del picco) e c_{SA} è la velocità dell'onda acustica nel campione Figura 4.23.

Tabella 4.3

Parametri da cui dipendono sensibilità e risoluzione del sistema di misura.

PARAMETR I	Impulso elettrico		Trasduttore	Amplificatori	
	Ampiezza V_p/d	Durata ΔT	Spessore A	Guadagno G	Ampiezza Banda
Sensibilità	D	D	D	D	D
Risoluzione		I	I		D

D: dir. proporzionale

I: invv. proporzionale

Da quanto appena esposto si può affermare, quindi, che la sensibilità e la risoluzione spaziale del sistema dipendono dalle caratteristiche dell'impulso elettrico e del trasduttore piezoelettrico; più precisamente che all'aumentare della durata del primo e dello spessore del secondo, aumenta la sensibilità ma diminuisce la risoluzione spaziale. La Tabella 4.3 evidenzia i parametri che influenzano in maniera diretta o in maniera inversa la sensibilità e la risoluzione del sistema.

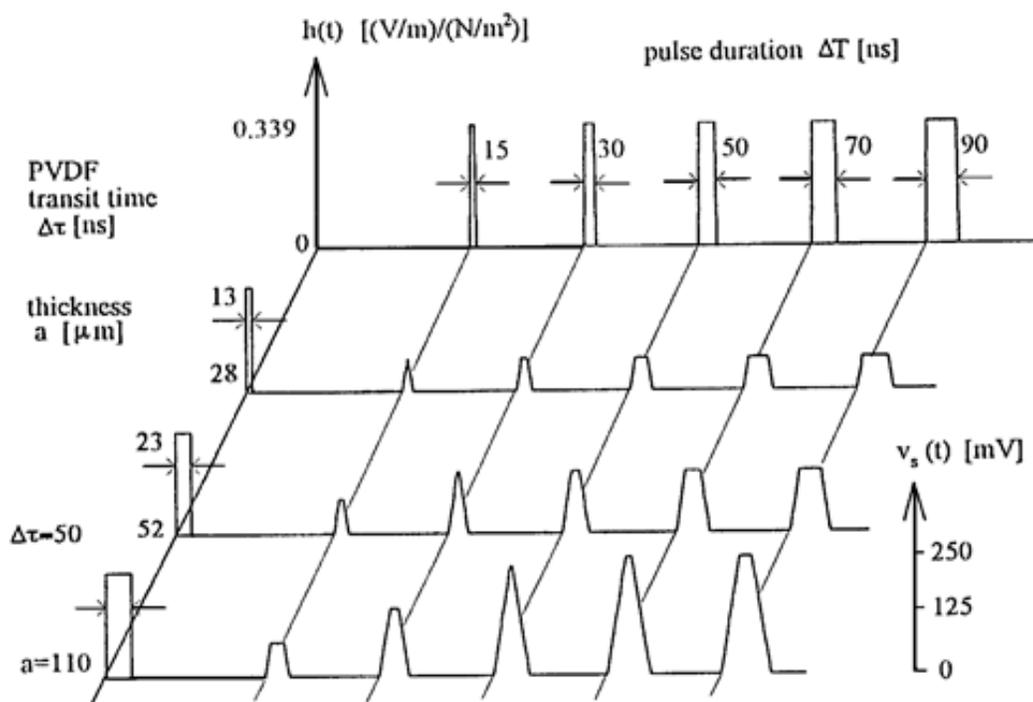


Figura 4.24

Risultati della simulazione al variare della durata dell'impulso elettrico e dello spessore del trasduttore [2].

Oltre a permettere le considerazioni appena riportate, sull'effetto delle caratteristiche dell'impulso elettrico e del trasduttore nei confronti della sensibilità e della risoluzione spaziale del sistema, le simulazioni hanno messo in evidenza l'esistenza di combinazioni ideali tra le due caratteristiche suddette. La Figura 4.24 mostra, ad esempio, la simulazione del segnale di uscita in funzione di cinque

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

diverse durate di impulso (15, 30, 50, 70 e 90 ns) e di tre diversi spessori del trasduttore (28, 52 e 110 μm). La figura permette di fare alcune considerazioni molto interessanti. A parità di spessore del trasduttore, si può notare che la sensibilità aumenta all'aumentare della durata dell'impulso, ma si osserva anche che ciò non avviene indefinitamente. Considerando il caso corrispondente allo spessore di 110 μm è evidente che la sensibilità aumenta passando dall'impulso di 15 ns a quello di 50 ns, ma per impulsi di durata superiore non si ha alcun miglioramento. Il segnale, infatti, mostra la stessa ampiezza ma presenta una zona piatta che giustifica la maggior larghezza. È bene osservare, a questo proposito, che a segnali più larghi corrisponde una minore risoluzione spaziale.

Una situazione analoga a quella descritta, a parità di spessore, si riscontra anche mantenendo costante la durata dell'impulso. Considerando, infatti, un impulso di 30ns, la Figura 4.24 mostra un aumento della sensibilità passando da 28 a 52 μm , ma solo un allargamento del segnale passando a 110 μm .

Osservando bene i dati grafici, si osserva che i limiti sopra descritti corrispondono alla condizione in cui la durata dell'impulso è pari al tempo $\Delta\tau$ impiegato dall'onda di pressione per attraversare il trasduttore o, per meglio dire, al tempo impiegato dal fronte dell'onda per passare da una superficie all'altra del trasduttore. Ciò porta all'individuazione di coppie di valori durata-spessore ottimali, che nella Figura 4.24 corrispondono alla diagonale passante per i picchi in cui non è presente una zona piatta (15 ns - 28 μm , 30 ns - 52 μm , 50 ns - 110 μm). A parità di spessore se la durata dell'impulso è maggiore dell'ottimale, quindi, ci si trova a destra della diagonale: la sensibilità corrisponde a quella della diagonale, ma la presenza di una zona piatta comporta una diminuzione di risoluzione spaziale. Se invece la durata è inferiore al valore ottimale, si è quindi a sinistra della diagonale: la sensibilità risulta inferiore a quella massima possibile con quello spessore di trasduttore e la risoluzione spaziale è peggiore di quella che si avrebbe con lo spessore corrispondente alla durata dell'impulso utilizzata.

Concludendo, quindi, si può affermare che se si usa una combinazione non ottimale esiste sempre una combinazione che, a parità di sensibilità presenta, una risoluzione spaziale migliore e quindi permette migliori prestazioni del sistema.

La Figura 4.25 riporta i risultati sperimentali relativi alla misura del segnale di uscita nelle medesime condizioni della simulazione di Figura 4.28. Come si può osservare le considerazioni fatte sono confermate anche dalle rilevazioni reali.

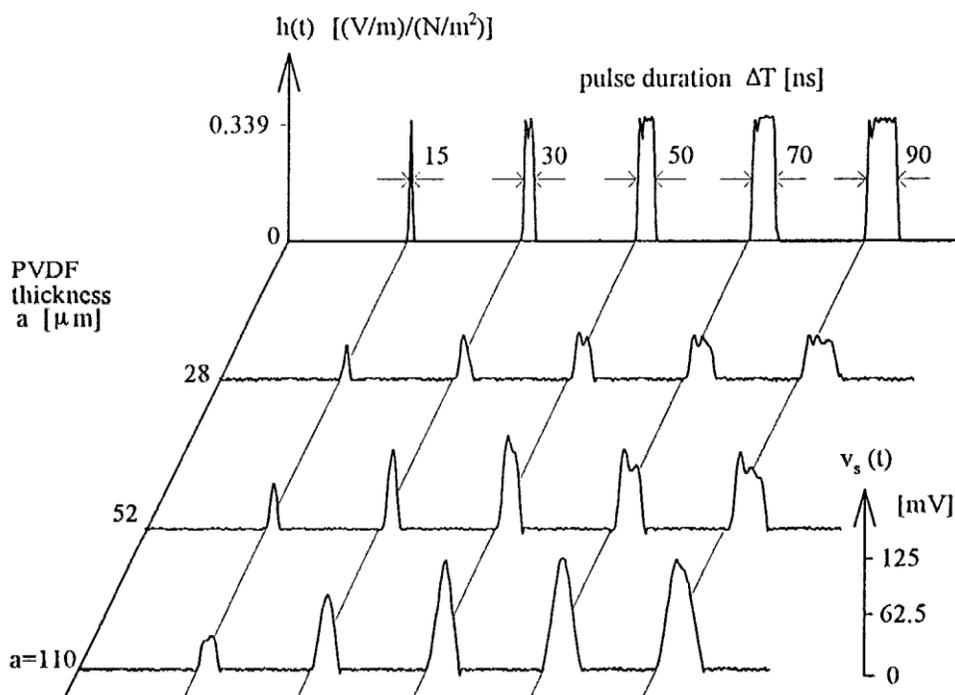


Figura 4.25

Risultati delle misure effettuate con varie durate dell'impulso elettrico e dello spessore del trasduttore su campioni reali [2].

La Figura 4.25 riporta i risultati sperimentali relativi alla misura del segnale di uscita nelle medesime condizioni della simulazione di Figura 4.24. Come si può osservare le considerazioni fatte sono confermate anche dalle rilevazioni reali.

Volendo aumentare la sensibilità si devono, quindi, aumentare contemporaneamente la durata dell'impulso e lo spessore del trasduttore e, analogamente, volendo migliorare la risoluzione spaziale si devono diminuire entrambe le caratteristiche. La condizione fondamentale da rispettare è che la durata dell'impulso corrisponda al tempo di transito nel trasduttore.

4.3.6 Attenuazione e dispersione dell'onda acustica

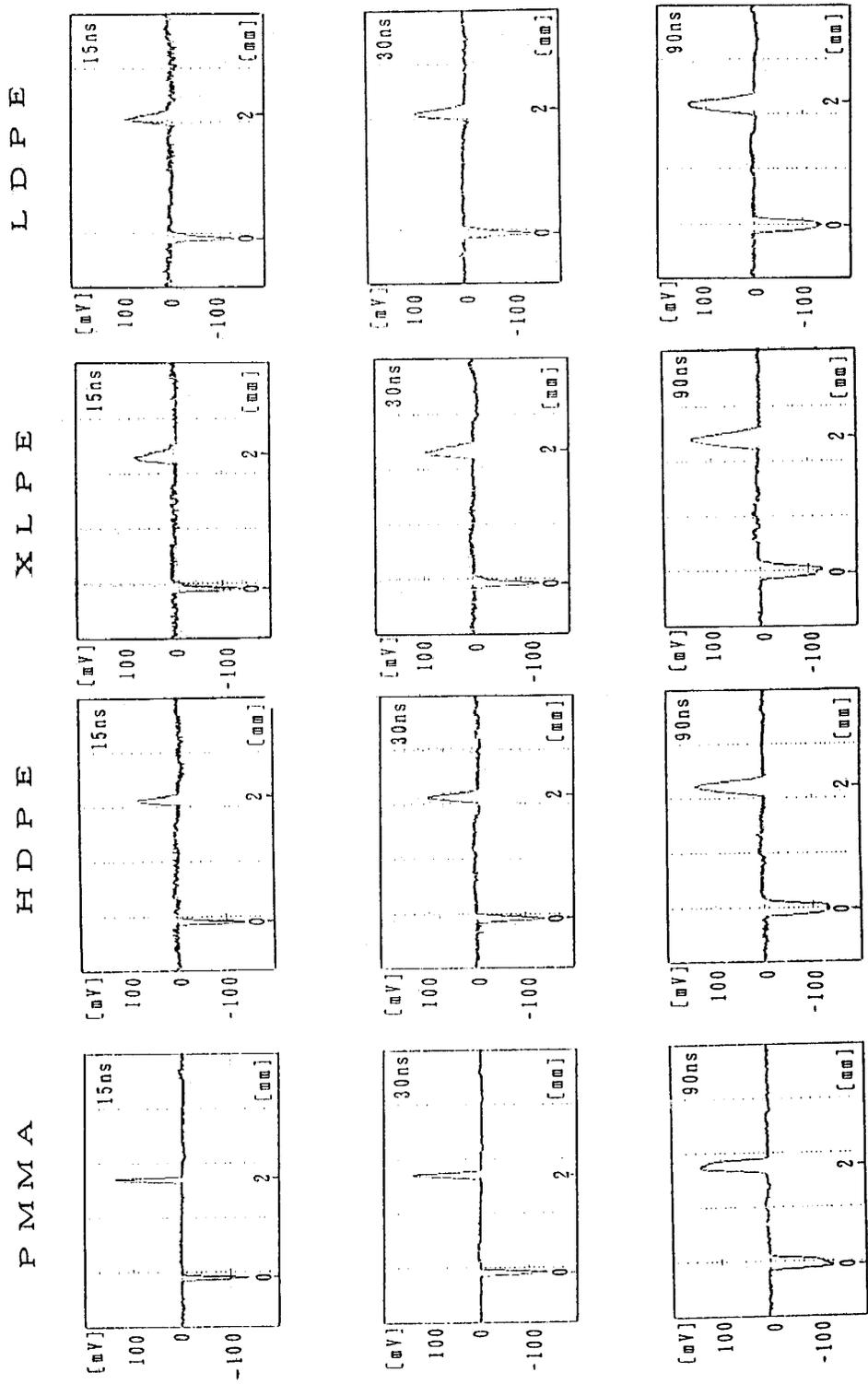


Figura 4.26

Segnali di uscita acquisiti in quattro tipi di materiali (PMMA, HDPE, XLPE e LDPE) [2].

Se si limita l'analisi ad un'onda acustica che si propaga attraverso un mezzo con basse perdite, si può affermare che minore è la durata dell'impulso elettrico (e quindi lo spessore del trasduttore) maggiore è la somiglianza tra il segnale di uscita ed il profilo di carica spaziale.

Nella maggiore parte dei materiali polimerici, però, l'attenuazione e la dispersione dell'onda acustica non possono essere trascurate soprattutto quando si vuole migliorare la risoluzione spaziale. Nella Figura 4.26 sono riportati i segnali di uscita relativi a diversi materiali dielettrici (PMMA, HDPE, XLPE e LDPE) per tre differenti durate dell'impulso di campo elettrico. Nella figura si può osservare che il segnale non è distorto nei campioni di PMMA, sia con durata dell'impulso elettrico pari a 90ns sia con durata 15ns. Nei campioni di XLPE, invece, il segnale risulta maggiormente distorto per impulsi di breve durata (15ns) rispetto a quanto avviene per impulsi di durata maggiore (90ns).

Si può allora concludere che nei materiali con perdite non trascurabili, come l'HDPE, l'XLPE e l'LDPE, un impulso elettrico di breve durata (combinato con il relativo spessore di trasduttore) migliora la risoluzione spaziale ma è soggetto ad una maggiore attenuazione e dispersione rispetto ad un impulso di maggiore durata.

Nella Figura 4.27 è riportato un diagramma schematico del profilo di carica spaziale e del relativo segnale di uscita per un materiale dielettrico con basse perdite, mentre nella Figura 4.28 è riportato un diagramma analogo riferito ad un materiale con perdite maggiori, come ad esempio il polietilene.

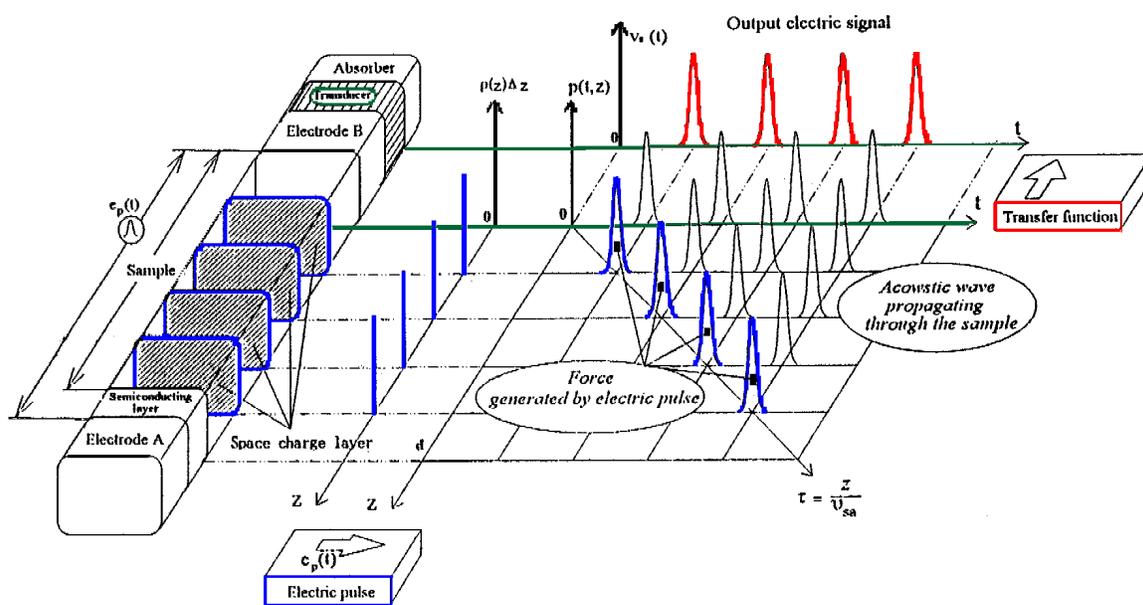


Figura 4.27

Diagramma schematico del profilo di carica e del segnale di uscita in un materiale con basse perdite. Sono mostrati il profilo di carica spaziale $\rho(z)$, la forza $f(z)$, l'onda acustica $p(t)$ ed il segnale di uscita $v_s(t)$ [2].

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA

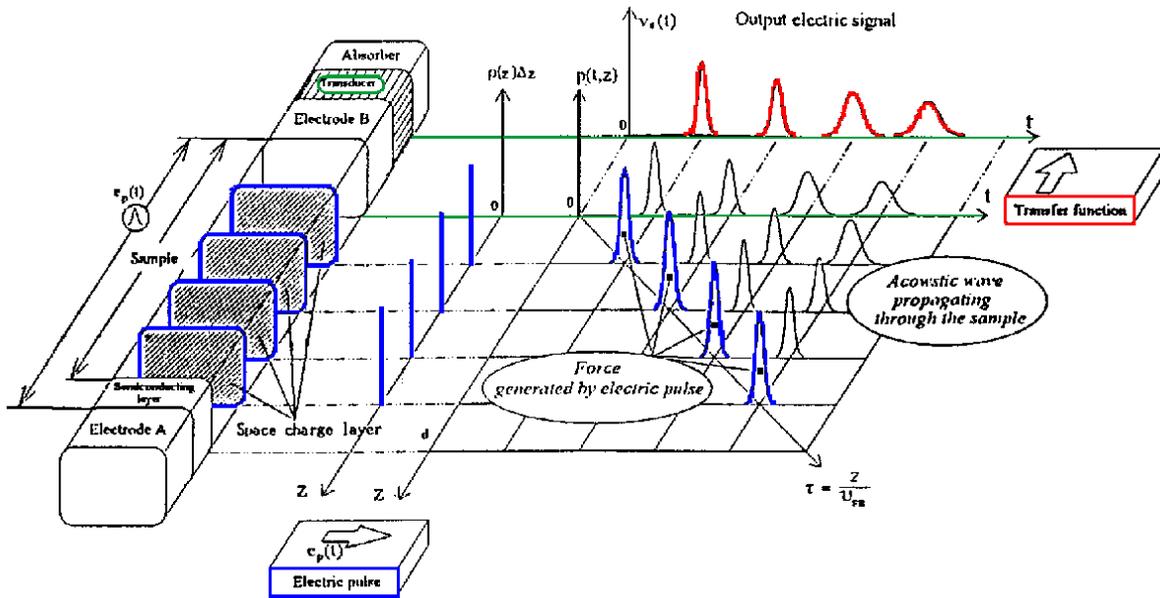


Figura 4.28

Diagramma analogo a quello di Figura 4.27, ma riferito ad un materiale con elevate perdite [2].

Come si può notare, in quest'ultimo caso, l'onda acustica è notevolmente distorta durante la propagazione; ciò è dovuto agli effetti di attenuazione e dispersione che si manifestano all'interno del campione. Confrontando i due diagrammi di Figura 4.25 e Figura 4.26, si nota come il segnale di uscita proveniente da un mezzo con perdite rilevanti non consente di ottenere informazioni esatte sul profilo di carica spaziale, come invece accade nel caso di materiale con basse perdite.

Considerando la propagazione di un'onda acustica piana $p(t,z)$ attraverso un materiale dielettrico in direzione $-z$, come riportato in Figura 4.27, l'evoluzione durante la propagazione può essere rappresentata dalla seguente equazione esponenziale:

$$p(t,z) = P_0 e^{j\omega(t-z/c)} = P_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad (4.33)$$

Dove P_0 è l'ampiezza dell'onda acustica alla posizione $z=0$, ω è la frequenza angolare, c è la velocità del suono e k è il numero d'onda. La velocità del suono è una costante per i materiali a basse perdite mentre è una funzione della frequenza per i mezzi con perdite. Anche l'ampiezza dell'onda in un mezzo reale è generalmente attenuata durante la propagazione a causa di molti fenomeni dissipativi tra i quali il più significativo è sicuramente la dissipazione di energia necessaria per la propagazione dell'onda. L'attenuazione e la dispersione dell'onda vengono introdotte nell'equazione 4.33 assumendo che k sia un numero complesso: $k = \beta - ja$, dove a è il fattore di attenuazione e $\beta = \omega / c$ è il fattore di dispersione.

Le proprietà di attenuazione e dispersione di un dato materiale sono quindi rappresentabili da specifici valori di α e β .

Per $z \geq 0$, introducendo i fattori di attenuazione e dispersione, la 4.33 può essere riscritta come:

$$p(t, z) = P_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4.34)$$

Sfruttando questa relazione è possibile eliminare artificialmente l'attenuazione e la dispersione dell'onda acustica, al fine di ricostruire in fase di elaborazione dei dati, a partire dal segnale misurato, la reale distribuzione di carica all'interno del campione.

4. Misura della carica di spazio: il metodo PEA



APPARATO DI MISURA ED ELABORAZIONE DATI

Capitolo 5

Nel seguente capitolo verranno descritti gli strumenti utilizzati per la realizzazione di prove PEA; si parlerà sia delle componenti hardware che delle componenti software.

5. APPARATO DI MISURA ED ELABORAZIONE DATI

In questo capitolo verrà descritto l'apparato PEA utilizzato per le misure effettuate su questa ricerca. Lo stesso sistema è quello utilizzato per le campagne di misure su cavi, sia modello che full size.

È importante evidenziare fin da subito che l'apparato utilizzato non è un apparato sperimentale, bensì il sistema è venduto per intero da un'azienda produttrice. Nel campo delle misure PEA vi sono molte aziende che producono il setup di misura in toto, tuttavia questi sistemi non vengono messi sul mercato, ma utilizzati internamente alle aziende stesse. Nel mondo, al momento, vi è una sola azienda che produce questi strumenti; questa è l'azienda che ha fornito l'apparato ed ha certificato la configurazione di misura da loro proposta come migliore. Con migliore si intende quella configurazione che permette la valutazione più realistica di carica spaziale, quindi con un segnale il più possibile libero da disturbi e che meglio rappresenta la distribuzione spaziale nella sezione di cavo.

Il sistema è sostanzialmente composto da cinque elementi:

- 1) Cella PEA
- 2) Generatore d'impulsi
- 3) Generatore HVDC (nel caso di cavi modello sono stati usati due generatori di polarità opposte)
- 4) Oscilloscopio digitale
- 5) Computer

La cella PEA contiene l'elettrodo di terra, il trasduttore piezoelettrico e l'amplificatore a ampia banda passante. Il segnale in uscita viene collegato all'oscilloscopio per essere acquisito ed elaborato. Come si vedrà nel Paragrafo 5.2 l'impulso è generato con una frequenza di 110 Hz, quindi il cavo verrà continuamente sollecitato dal campo elettrico impulsivo e, ad ogni sollecitazione, si crea un insieme di onde di pressione date dalle cariche nel materiale che vanno a generare un segnale. Questo segnale viene quindi ripetuto ad intervalli regolari nel tempo. Perché l'oscilloscopio possa acquisire in maniera sensata il segnale generato dalle cariche vi è quindi bisogno di un segnale di trigger. Questo segnale è generato dallo stesso generatore d'impulso e viene connesso ad una seconda porta dell'oscilloscopio.

L'oscilloscopio è infine collegato ad un PC tramite cavo ethernet, opportunamente disaccoppiato otticamente, per il dialogo e lo scambio di informazioni relative al programma d'acquisizione e ai dati acquisiti.

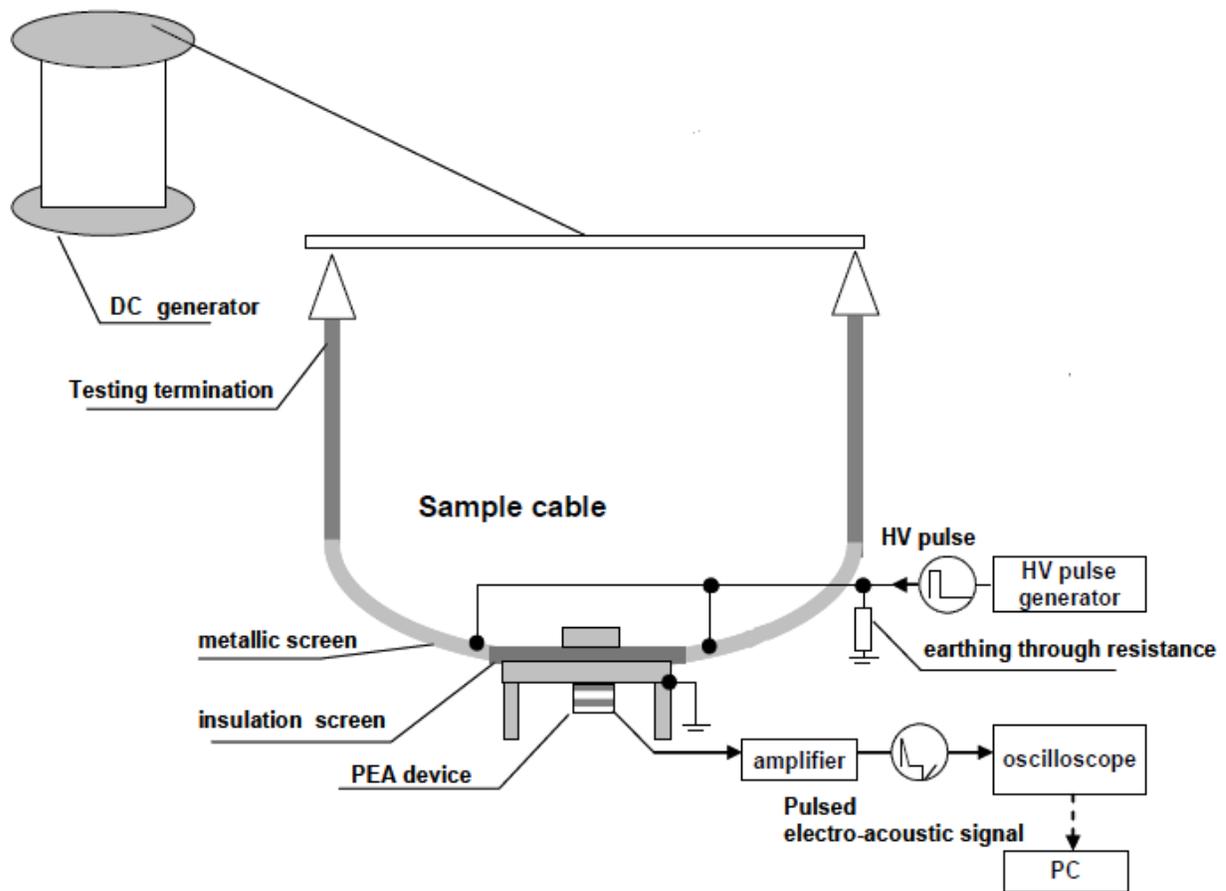


Figura 5.1
Schema di principio del setup per le misure PEA su cavi [8].

Nel Capitolo 6 e nel Capitolo 8 i sistemi utilizzati differiscono per la sola cella PEA. Infatti le misure sono state fatte con due celle che sono utilizzate per tipi di campioni diversi: cella per cavi modello e cella per cavi full size. La cosa che differenzia le due è a livello costruttivo; la prima è stata costruita con le dimensioni delle componenti atte a massimizzare l'efficienza della misura in spessori dai 2 a 8 mm, la seconda è stata invece costruita con la stessa logica, ma per spessori che vanno dai 10 mm in poi.

In realtà questa tesi porterà alla luce un difetto costruttivo nella cella per cavi full size; il difetto concorrerà con altri fattori a rendere la misura sui relativi capi inutile dal punto di vista elaborativo. Di questo se ne parlerà nel Capitolo 8, dove si tratterà della campagna di misure effettuata sul progetto IFA2.

5.1 La cella PEA

La Figura 5.2 ritrae la cella PEA scomposta, quindi con le parti meccaniche non connesse tra loro.

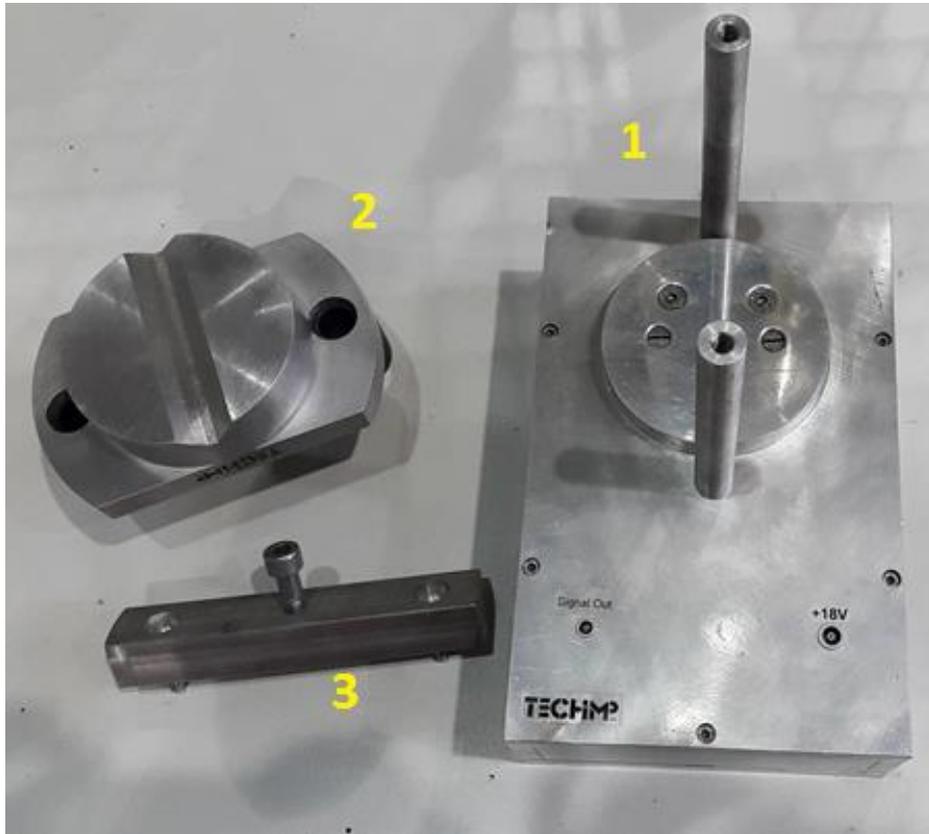


Figura 5.2
Cella PEA.

Col numero 1 è indicata la cella vera e propria. Si tratta di una scatola di alluminio al cui interno sono contenute le parti utilizzate per rilevare le onde di pressione generate dalle cariche. Nella parte bassa della cella si possono distinguere due connessioni, queste sono per l'alimentazione e l'uscita del segnale che viene connessa all'oscilloscopio. Nella parte alta si distingue un elemento circolare con due cilindri che si sviluppano perpendicolarmente alla cella stessa. L'elemento circolare è appunto l'elettrodo di terra e la parte visibile è lo spessore di alluminio dimensionato per evitare le riflessioni del segnale di cui si è parlato nel capitolo precedente; nella cella per cavi modello questo spessore è di 15 mm, mentre nella cella per i cavi full size lo spessore è circa il doppio. Le viti che si notano nella sommità servono per tenere ancorato il trasduttore piezoelettrico al di sotto dello spessore metallico, quindi dalla parte opposta a quella dove verrà adagiato il cavo. I due cilindri invece non sono altro che i supporti sui quali verrà inserito il numero 2 e fissato il numero 3.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

Il numero 2 non ha alcuna funzionalità di tipo elettrico, ma puramente meccanico. Una volta adagiato il cavo sull'elettrodo di terra l'elemento 2 viene adagiato sopra facendo passare i cilindri di 1 nelle apposite guide. La scanalatura che si vede in 2 serve per centrare il cavo sopra il trasduttore e evitare che si muova durante la misura.

Una volta che questa operazione è stata fatta si mette l'elemento 3 sopra ai due cilindri e si usano le viti per fissarlo; mentre le due viti esterne servono per ancorare l'elemento alla struttura, la vite interna serve per spingere l'elemento 2 verso il cavo garantendo l'immobilità di quest'ultimo.

Nei provini piani viene inserito uno strato di materiale semiconduttivo, che funge da reale elettrodo di alta tensione, fra l'elettrodo e l'isolante da testare. Questa soluzione viene adottata allo scopo di eliminare la riflessione delle onde acustiche sull'interfaccia campione-elettrodo metallico. Il semiconduttivo, infatti, presenta le medesime caratteristiche acustiche del campione in esame e pertanto non dà origine a riflessioni; inoltre agisce come linea di ritardo nei confronti delle riflessioni che, inevitabilmente, si producono all'interfaccia semiconduttivo-elettrodo metallico e che andrebbero altrimenti a sovrapporsi al segnale principale. Mentre nelle celle per provini piani questa componente semiconduttiva è aggiunta artificialmente, nelle prove su cavi si sfrutta la natura stessa del cavo. Infatti, per uniformare il campo elettrico, i cavi hanno due strati di semiconduttivo: uno fra conduttore e isolante (semiconduttiva interna) e l'altro fra schermo ed isolante (semiconduttiva esterna). Quando si fanno delle prove PEA si elimina quindi lo schermo in un'area sufficientemente ampia e si piazza la cella, quindi l'elettrodo di terra, direttamente sulla semiconduttiva esterna del cavo.

Come detto l'elettrodo di terra è formato da una lastra metallica di 15 mm dimensionata in maniera tale da introdurre un ritardo nelle riflessioni acustiche. Questo ritardo permette di evitare che al segnale di interesse si vadano a sovrapporre disturbi introdotti dall'impulso o riflessioni acustiche del segnale stesso.



Figura 5.3

Segnale acquisito dall'oscilloscopio digitale. Nella figura si notano: il disturbo al tempo zero dovuto all'impulso elettrico, il segnale e il primo rimbalzo.

La lunghezza del ritardo tra campione e trasduttore, quindi lo spessore dell'elettrodo inferiore, deve essere tale da permettere di separare nettamente l'onda acustica relativa al segnale d'interesse (indicato in Figura 5.3 da *Segnale*) da ogni sua riflessione residua, oltre che, come già detto, di evitare il rumore dovuto all'impulso elettrico generato all'istante 0, cioè coincide con la generazione dell'impulso. Quando l'onda acustica arriva all'interfaccia tra elettrodo inferiore e trasduttore piezoelettrico, infatti, la differenza di impedenza acustica provoca, oltre alla trasmissione di parte del segnale, anche una sua parziale riflessione. Quest'ultima viaggia a ritroso nell'elettrodo fino a raggiungere l'interfaccia con il campione dove viene ulteriormente divisa in una parte trasmessa ed una riflessa. La parte riflessa torna, quindi, all'interfaccia elettrodo-trasduttore dove subisce di nuovo lo stesso processo. La componente che viene trasmessa, attraversando il trasduttore darà origine ad un segnale teoricamente identico a quello principale ma fortemente attenuato, quello che in Figura 5.3 è indicato con *Prima riflessione*. La separazione temporale tra il segnale principale ed il rimbalzo (ed analogamente tra quest'ultimo ed un ulteriore rimbalzo) è dato dal doppio del tempo impiegato dall'onda di pressione per attraversare la linea di ritardo.

Il tempo necessario all'onda acustica per attraversare un elettrodo può essere calcolato conoscendo le dimensioni dell'elettrodo e la velocità di propagazione del suono nel metallo. La velocità di propagazione dell'onda nell'alluminio è circa 3600 m/s, come detto gli elettrodi hanno dimensioni diverse a seconda del tipo di cella, quindi il segnale si avrà con ritardi diversi a seconda del tipo di cella.

Nella cella per cavi modello lo spessore è di 15 mm, questo porta ad una distanza fra le riflessioni di 8.5 μ s; questo vuol dire che, se la cella è dimensionata bene, l'impulso relativo alle cariche nell'elettrodo HV deve arrivare entro quel lasso di tempo. I cavi modello hanno uno spessore dell'isolante che varia fino ad un massimo di 6 mm. La dimensione indica quindi la distanza fra i due elettrodi, cioè il percorso che l'onda generata dalle cariche sull'elettrodo HV deve fare prima di arrivare allo spessore di alluminio. La velocità del suono nel XLPE è di circa 2.3 km/s, considerando uno spessore di 6 mm si ha che, dal primo picco (quello relativo alle cariche sull'elettrodo di terra), il secondo arriva dopo 2.6 μ s; questo è in perfetto accordo su quanto detto dato che è ampiamente minore del tempo di riflessione.

Parlando dei cavi full size lo spessore dell'isolante varia di diversi millimetri da cavo a cavo, quindi la valutazione deve essere fatta volta per volta; quello che si può fare però è calcolare il tempo di ritardo delle riflessioni. Come già detto in precedenza lo spessore dell'elettrodo è di 30 mm e la velocità

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

del suono nell'alluminio è nota; allora si può fare una valutazione del tempo a cui si ha la prima riflessione del segnale.

In Figura 5.3 si è ampliata la base dei tempi dell'oscilloscopio in modo da avere contemporaneamente il segnale d'interesse ed il suo primo rimbalzo.

Il trasduttore piezoelettrico, utilizzato per convertire l'onda acustica generata dalla carica spaziale dentro il provino in un segnale elettrico, è un film di polivinilidene fluoruro (PVDF). Questo materiale è quello maggiormente utilizzato nei sistemi PEA, data la sua eccellente ampiezza di banda nel dominio delle frequenze (recentemente sono stati proposti altri materiali come il Niobato di Litio, grazie al quale sarebbe possibile operare a temperature superiori agli 80°C).

Il film di PVDF è metallizzato su entrambe le facce, una delle quali è posta direttamente a contatto con l'elettrodo inferiore. Essendo questo elettrodo riferito a terra, il segnale d'uscita del trasduttore viene rilevato misurando la differenza di potenziale tra la faccia inferiore del trasduttore (quella non a contatto con l'elettrodo) e la massa.

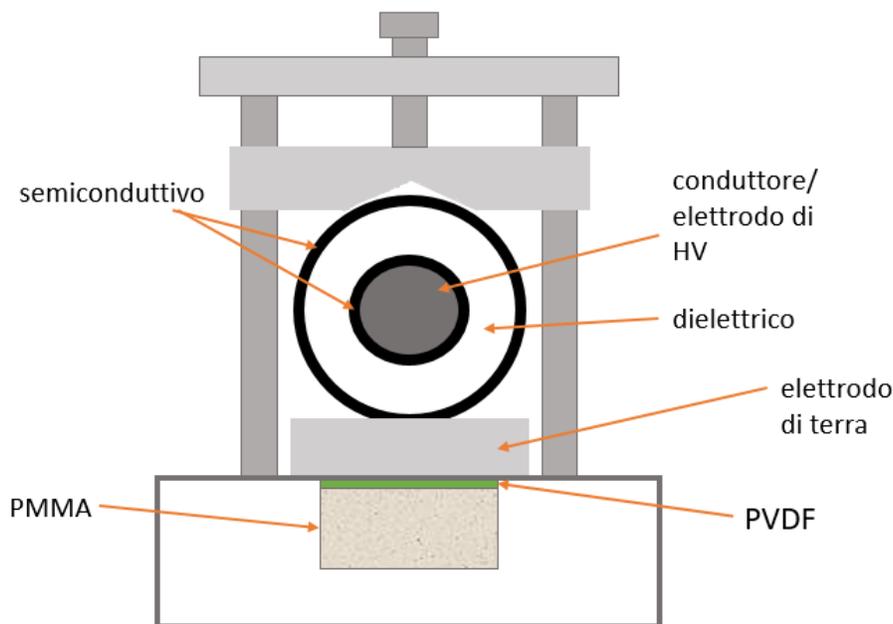


Figura 5.4
Schema del sistema PEA per cavi.

Al di sotto del trasduttore (considerando la direzione di propagazione dell'onda acustica, Figura 5.4) è posto uno strato di materiale fonoassorbente (in molti casi viene utilizzato sempre PVDF). Quest'ultimo strato ha lo scopo di evitare la riflessione dell'onda acustica in uscita dal trasduttore; se non ci fosse il giusto accoppiamento, infatti, l'onda acustica sarebbe parzialmente riflessa

dall'interfaccia tra il trasduttore e il successivo materiale, con la conseguente perturbazione del segnale d'uscita.

Il tutto viene mantenuto in posizione da una piastra di bloccaggio in polimetilmetacrilato (PMMA, che funge anche da ulteriore strato fonoassorbente), la cui pressione deve essere uniforme su tutto il piezoelettrico e non deve alterare la capacità di risposta del piezoelettrico stesso.

Il segnale generato dal trasduttore è amplificato di 50dB mediante un amplificatore ad ampia banda.

Il complesso costituito da trasduttore e stadio di amplificazione viene schermato da un contenitore metallico che funge anche da supporto per la cella di misura (Figura 5.2).

Deve infine essere puntualizzato che durante la prova sulla superficie dell'elettrodo di terra, dove viene adagiato il cavo, viene messo un sottile strato di olio siliconico; questo serve per migliorare il contatto fra lo strato semiconduttivo del cavo e la lastra metallica della cella, riducendo così l'impedenza acustica.

I due amplificatori messi in serie, che vanno a creare il ramo d'amplificazione del segnale, presentano quindi un guadagno di circa 50dB. Considerando il valore di C_p caratteristico degli amplificatori utilizzati in questi sistemi e quello dell'impedenza di ingresso R_A , si ottiene un valore della costante di tempo del circuito traduttore-amplificatore pari a 100ns. Il sistema si comporta come un filtro passa basso la cui frequenza di taglio f_T risulta pari a 1.6MHz.

I cavi testati hanno degli spessori che vanno dal millimetro alle decine di millimetri, questo implica dei tempi di transito dell'onda acustica sul dielettrico dell'ordine dei μs . Dei tempi così lunghi corrispondono a frequenze dell'ordine di frazioni di MHz, quindi si ha che la catena trasduttore-amplificatore permette la trasmissione del segnale all'oscilloscopio.

5.2 Il generatore d'impulso di tensione

In Figura 5.5 si ha lo schema costruttivo della soluzione adottata per la generazione dell'impulso elettrico utilizzato nelle misure PEA. L'impulso è generato mediante una linea di ritardo realizzata con una guida d'onda.

Con questa tecnica si ottiene un impulso di ampiezza pari alla metà della tensione continua V_0 e di durata pari a due volte il rapporto tra la lunghezza della linea e la velocità con cui un'onda elettromagnetica si propaga in essa. La lunghezza della linea è quindi il parametro che si utilizza per

modificare la durata dell'impulso; per una durata dell'impulso di circa 10 ns, corrisponde una lunghezza della guida d'onda di circa 800 mm.

L'impulso può avere un'ampiezza variabile impostabile modificando il valore di V_0 ; il valore di picco dell'impulso può variare da 10 a 0 kV, generalmente nelle prove si è utilizzato un impulso di 7 kV.

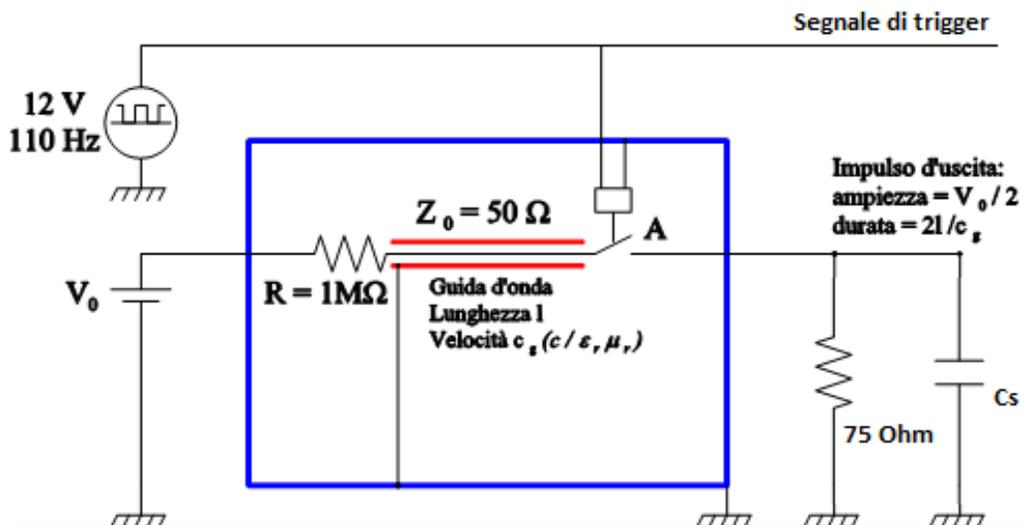


Figura 5.5
Schema del generatore d'impulso.

L'interruttore A è un *reed relè* con tensione di tenuta tra i contatti pari a 10 kV; la bobina del relè è alimentata con un segnale ad onda quadra unipolare di frequenza 110 Hz e ampiezza di 12 V. Questo segnale genera quindi un ciclo aperto-chiuso del relè con un *duty cycle* pari ad $\frac{1}{2}$ del periodo dell'onda quadra stessa. Ad ogni ciclo si ha quindi la generazione di un impulso di tensione.

In Figura 5.5 si ha, in maniera semplificata, anche il collegamento del generatore ad impulsi al circuito di misura. Come si vede in Figura 5.1, l'impulso viene applicato sulla semiconduttiva esterna del cavo ad una distanza dalla cella. Il cavo può essere visto come un condensatore, quindi può essere rappresentato, in prima approssimazione, dalla capacità C_s in Figura 5.5. La natura capacitiva del cavo fa sì che l'impulso, ad elevata frequenza, tenda a sollecitare le capacità piuttosto che a richiudersi su percorsi ohmico-induttivi; il comportamento dell'impulso verrà approfondito in seguito nel Paragrafo 5.2.1.

Il segnale ad onda quadra, oltre a comandare il reed relè, funge anche da segnale di trigger per la lettura dell'oscilloscopio. Il collegamento con l'oscilloscopio è realizzato attraverso due attenuatori di

20db ciascuno, i quali realizzano anche la resistenza da 75Ω (valore pari all'impedenza caratteristica della guida d'onda) che funge da carico per il generatore e che è in parallelo al circuito del campione.

Nelle celle l'onda acustica arriva al trasduttore piezoelettrico con un ritardo dal segnale di generazione dell'impulso, questo ritardo è sostanzialmente dato dal tempo necessario all'onda per attraversare l'elettrodo inferiore, circa $4 \mu\text{s}$.

Tutto il circuito dell'impulso di tensione è realizzato mediante cavi coassiali con impedenza caratteristica di 50Ω . Nella Figura 5.6 è riportato un esempio di impulso di tensione generato dalla famiglia di questi strumenti; in questo caso si fa riferimento ad un generatore da 5 ns che è già riportato in letteratura, per riportarsi al caso dei generatori d'impulso utilizzati per questa prova basta scalare le dimensioni dei tempi e delle ampiezze, ma i ragionamenti rimangono identici.

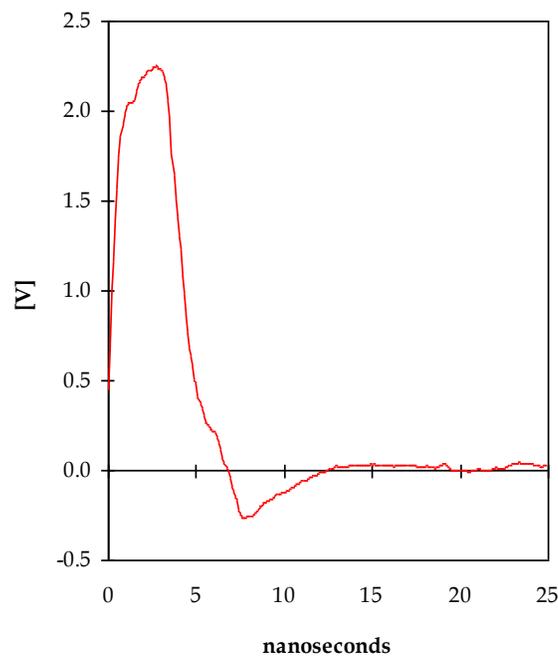


Figura 5.6

Impulso di tensione prodotto da un generatore d'impulso impostato a 25 V e 5 ns [2].

In figura si nota che l'impulso ha una regione negativa, questa è dovuta all'accoppiamento fra il generatore ed il restante circuito. Quando il *reed relè* si chiude l'impulso arriva al condensatore C_S che si carica con una costante di tempo data da $C_S Z_0$. Inizialmente il condensatore è un cortocircuito e la linea si comporta come se non vi fosse un carico. In questa condizione si ottiene un rimbalzo negativo, che però non è uguale e opposto all'impulso, perché durante questo lasso di tempo C_S si è caricato e ora funge da interruttore aperto.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

Dopo l'impulso non vi è più una tensione di carica, quindi il condensatore tende a scaricarsi sulla resistenza di carico seguendo una dinamica dettata dalla costante di tempo $C_S R_{75\Omega}$. In questo caso si ha un rimbalzo di segno opposto rispetto al precedente. L'effetto provocato dalla scarica/carica del condensatore è rappresentato in Figura 5.7.

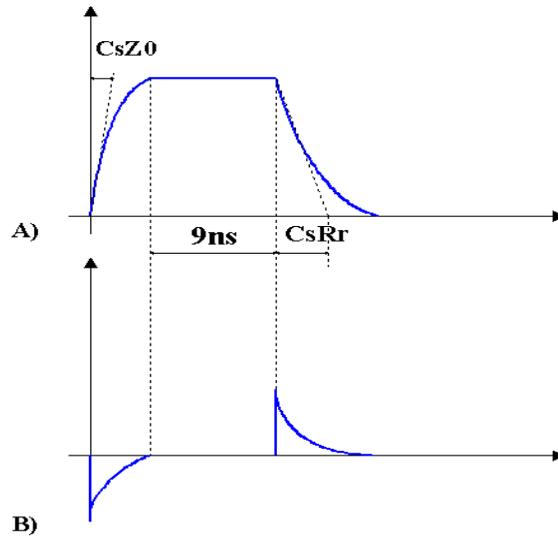
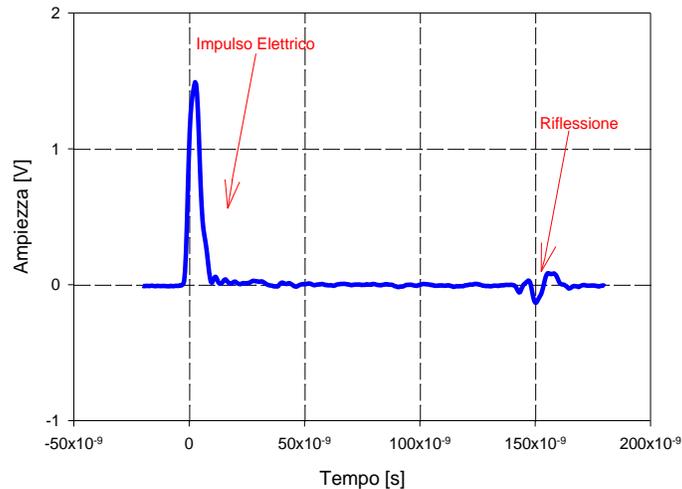


Figura 5.7

Carica-scarica del campione e rimbalzi generati dall'impulso [1].

Questo significa che l'impulso generato, sul campione provoca un doppio effetto: un'onda utile per valutare le cariche e un'onda che viaggia in direzione opposta tornando alla sorgente. La seconda onda, quando torna al generatore si può trovare due condizioni che però portano allo stesso effetto, il relè A può essere chiuso (impedenza infinita) o aperto (l'onda incontra una resistenza di $1M\Omega$). In entrambe i casi l'onda subisce un'ulteriore riflessione e torna indietro verso il campione. Il tempo necessario per il rimbalzo e per raggiungere nuovamente il campione dipende dalla lunghezza della connessione fra *reed relè* e cavo.

Nella Figura 5.8 è rappresentato l'esempio di un impulso con il suo relativo rimbalzo, il tutto ottenuto con una lunghezza della linea relè-provino pari a 10 m.

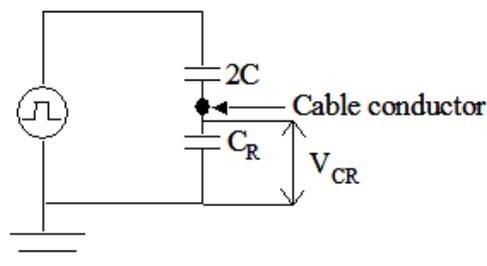
**Figura 5.8**

Impulso di tensione generato e relativo rimbalzo [2].

Si capisce, quindi, come diventi di notevole importanza scegliere la lunghezza del collegamento in maniera opportuna, per evitare che il rimbalzo dia origine a falsi segnali. Solitamente esistono due possibilità: un collegamento molto lungo per allontanare il più possibile il rimbalzo dall'impulso oppure un collegamento quasi nullo in modo che il rimbalzo sia coperto dall'impulso stesso. Questa seconda opzione è quella adottata nel sistema acquistato ed è il motivo della deformazione messa in evidenza nella Figura 5.6.

5.2.1 Accoppiamento dell'impulso elettrico

Per le prove PEA su provini piani l'impulso viene iniettato direttamente sugli elettrodi, questo implica una variazione impulsiva del campo elettrico e quindi un effetto impulsivo anche sulla carica interna al dielettrico. Con questa configurazione è facile intuire come l'impulso vada a sollecitare lo spessore dell'isolante interessato dalla misura, si ha una rappresentazione in Figura 5.9.

**Figura 5.9**

Circuito equivalente del percorso dell'impulso in una prova PEA per geometria piana [9].

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

Riferendosi ad una configurazione cilindrica, cioè quella per prove su cavo, la rappresentazione del circuito del percorso dell'impulso risulta più complicata. Questo perché l'impulso non viene iniettato direttamente sugli elettrodi, ma si creano degli elettrodi apposta sul semiconduttivo esterno dell'isolante.

Mentre nel caso di provino piano l'impulso è applicato direttamente sul condensatore che schematizza la zona sotto esame (C_R in Figura 5.9), nel caso di un cavo l'impulso si applica esternamente alla zona e tramite le impedenze date dai condensatori si propaga sul provino.

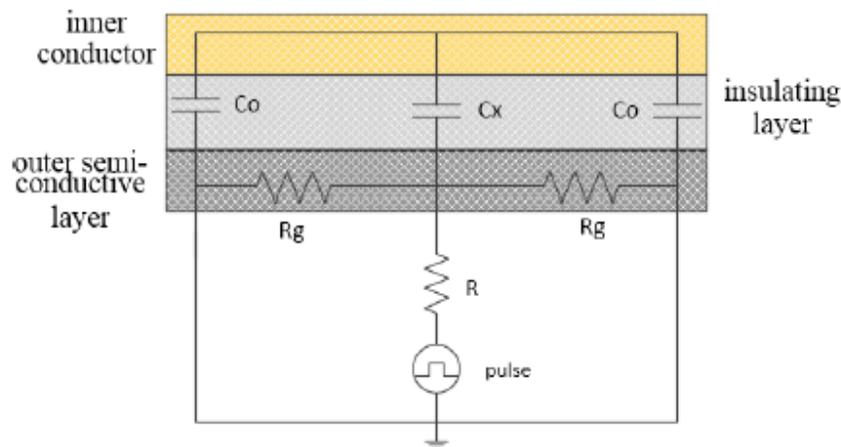


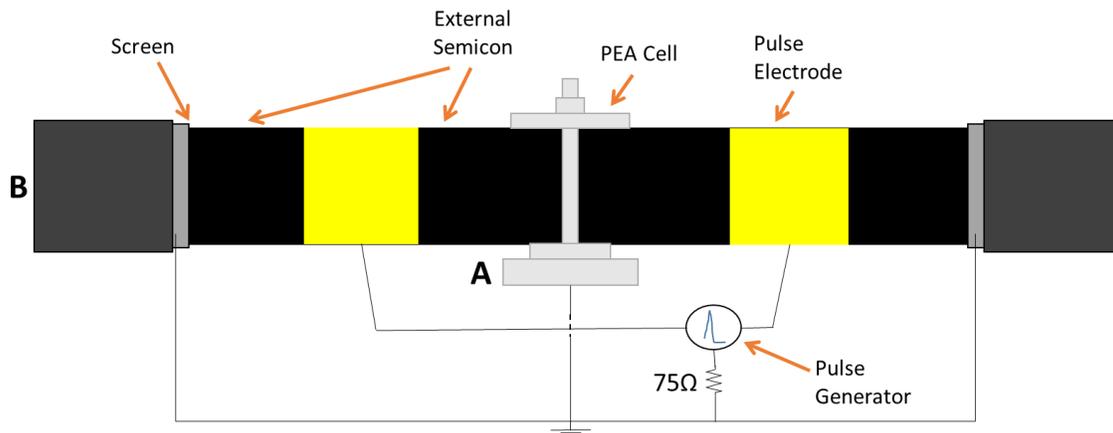
Figura 5.10

Circuito equivalente del percorso dell'impulso in una prova PEA in geometria cilindrica [6].

La Figura 5.10 rappresenta il circuito equivalente del percorso dell'impulso più comunemente utilizzato negli studi di prove PEA su cavi. Questa schematizzazione però prevede una connessione dell'impulso non del tutto chiara; infatti sembrerebbe che l'impulso venga iniettato direttamente sulla C_x , cosa che in realtà non accade. Nel grafico vengono tenuti in considerazione gli elementi che sono fra l'elettrodo di iniezione dell'impulso e la cella. In particolare si ha:

- R è la resistenza che in Figura 5.5 è indicata con 75 Ohm
- R_g è la resistenza del semiconduttivo fra l'elettrodo di iniezione dell'impulso e la cella
- C_0 è la capacità sulla quale opera l'impulso, è data dalla capacità caratteristica del cavo per unità di lunghezza e moltiplicata per la dimensione dell'elettrodo dell'impulso
- C_x è la capacità relativa alla porzione di isolante che viene studiata, il valore è dato ancora una volta dalla capacità caratteristica del cavo per unità di lunghezza e moltiplicata per la dimensione dell'elettrodo inferiore (di terra)

Uno studio più approfondito può essere fatto partendo dallo schema della prova PEA su cavo in Figura 5.11.

**Figura 5.11**

Rappresentazione delle connessioni di cella e impulso in una prova PEA su cavo.

Lo schema in Figura 5.11 è stato indicato come il miglior setup del sistema per il compimento della misura dalla azienda produttrice dello strumento.

Partendo dal posizionamento degli elementi sul cavo si può quindi rappresentare il circuito equivalente del percorso dell'impulso a parametri concentrati.

Nello schema tutti gli elementi verranno indicati come se fossero dei valori per unità di lunghezza, questo perché si vedrà che variando le dimensioni sia degli elettrodi che degli schermi, come anche le posizioni, si ottiene una risposta diversa del sistema, quindi saranno diversi anche i valori dei componenti stessi.

Per semplicità verrà proposto lo schema circuitale che coinvolge la metà del cavo che va dalla cella al terminale, la parte opposta sarà speculare, e porterà il medesimo effetto sulla capacità di test C_x del lato valutato.

Tutte le capacità indicate sono date dalla capacità caratteristica del cavo per unità di lunghezza moltiplicata per la lunghezza del tratto considerato. Allo stesso modo viene calcolata anche la resistenza del tratto semiconduttivo.

Nel campo della AC i materiali isolanti sono caratterizzati dal $\tan \delta$ che è il parametro che indica le perdite nel dielettrico. Questo fattore è dato dalla presenza di una corrente di dispersione nel materiale. In DC questo fattore non ha senso che venga calcolato, in quanto non si ha un andamento alternato della tensione, quindi il fenomeno delle correnti di dispersione non si manifesta. Nonostante ciò bisogna tenere conto di un altro fenomeno di dispersione, che è quello della conducibilità non nulla del dielettrico. Per questo motivo nel circuito sono presenti delle resistenze longitudinali in parallelo con le capacità.

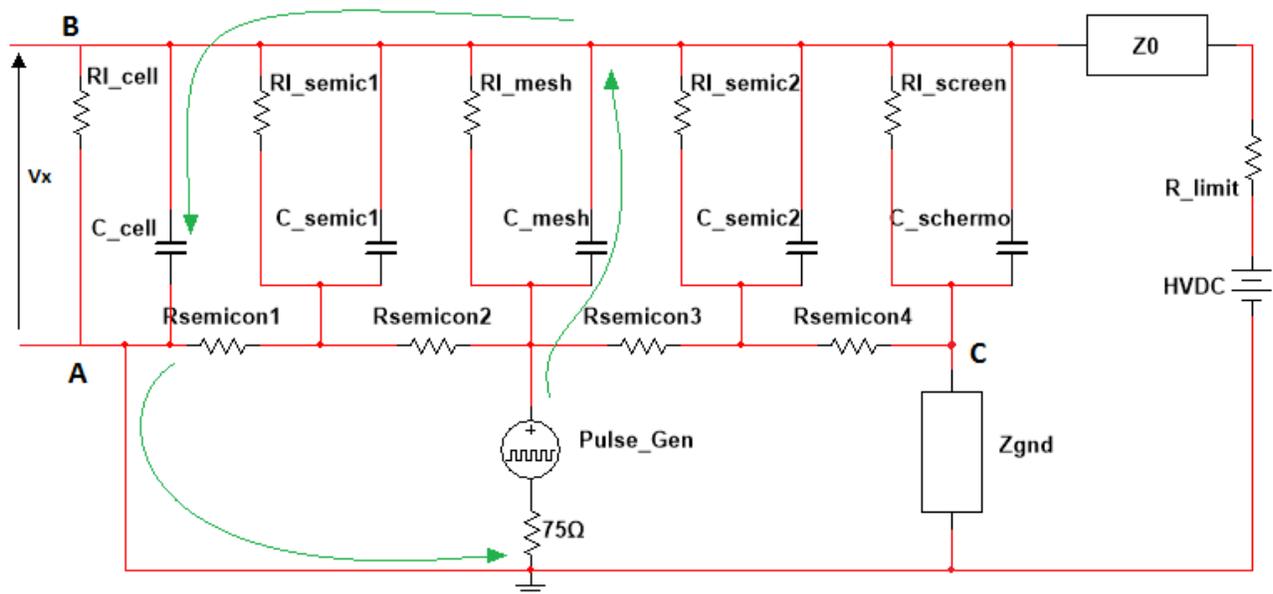


Figura 5.12

Circuito equivalente a parametri concentrati del percorso dell'impulso nelle prove PEA in caso di geometria cilindrica (su cavo).

Come già detto la rappresentazione tiene in considerazione solo di un lato della configurazione, questo vista la simmetria del circuito. A prima vista si può notare che il circuito è divisibile in due parti, la parte che corrisponde al cavo e quella che corrisponde ai generatori. Queste due parti sono a loro volta suddivisibili; nella parte HV possono essere distinti il generatore DC e il generatore d'impulso, per quanto riguarda il cavo invece si possono riconoscere diverse aree, ognuna delle quali corrispondente ad una zona del cavo. Le zone sono riconoscibili dalla Figura 5.11 o nella Figura 5.1 partendo dalla cella e spostandosi verso il generatore in una delle due direzioni. Da sinistra a destra si ha:

- a) Cella
- b) Semiconduttivo (lunghezza che va dalla cella all'elettrodo di iniezione dell'impulso)
- c) Calza metallica (elettrodo di iniezione dell'impulso)
- d) Semiconduttivo (uguale al punto b ma fra elettrodo dell'impulso e schermo)
- e) Schermo del cavo

La Z_0 è l'impedenza caratteristica del cavo ed è data dai parametri del cavo stesso. R_{limit} è la resistenza di limitazione che viene messa tra il generatore e il cavo. Nei test nel Capitolo 6 la resistenza utilizzata è del valore di 2.8 MΩ; questa è stata realizzata con resistenze in serie avvolte su un tubo

isolante, in tal modo si è aumentato il diametro equivalente della connessione generatore-cavo ottenendo una riduzione dell'effetto corona (Figura 5.13), altrimenti troppo elevato per poter fare una prova.

Nel Capitolo 8 si è invece utilizzata la resistenza utilizzata anche durante le prove del PQ test, questa è fatta con un tubo semiconduttivo ed è sull'ordine di grandezza di qualche $M\Omega$.



Figura 5.13

Connessione fra generatore HVDC e cavo in prova tramite resistenza di limitazione.

R_{semicon} è la resistenza del semiconduttivo che separa i vari stadi cella-elettrodo impulso e elettrodo impulso-schermo.

La V_x è dunque la tensione impulsiva che viene applicata ai capi del provino, è quindi la quantità di impulso che viene utilizzata per eccitare le cariche di spazio valutabili dalla misura. Lo scopo della simulazione è riuscire a massimizzare questo valore in funzione della variazione degli altri, che dipendono dalla dimensione delle aree di Figura 5.11.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

La linea orizzontale dove sono posizionate le resistenze longitudinali rappresenta quello che in concreto è la superficie esterna del conduttore delimitata dallo schermo metallico. Come si vede in Figura 5.12, proseguendo in maniera radiale oltre lo schermo, si ha anche l'armatura, a livello elettrico non si ha però alcun effetto in quanto, il campo elettrico o eventuali correnti, si richiudono sullo schermo.

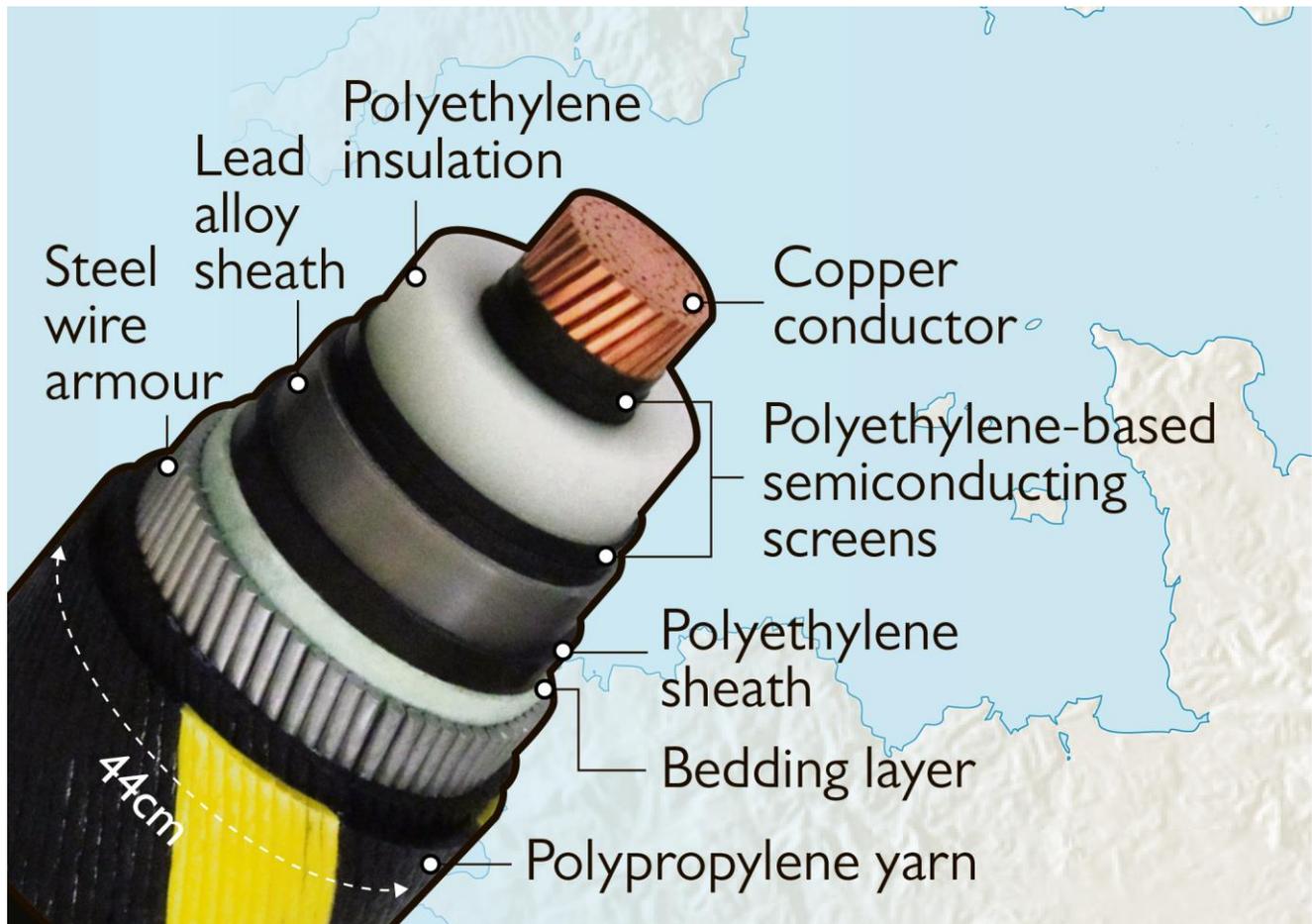


Figura 5.14

Sezione di un cavo marino [IFA2 - Prysmian].

Sulla superficie esterna del cavo vi è anche posizionata la cella, da qui si capisce la connessione a terra del punto A. Allo stesso modo si ha una connessione a terra nel punto C, perché in questa area vi è lo schermo che viene connesso a terra tramite l'impedenza Z_{gnd} . Questa impedenza è per evitare il collegamento franco a terra dello schermo; in questo modo, in alcune configurazioni si aumenta la parte reale di tale impedenza, aumentando così l'impedenza lato schermo vista dall'impulso e facendo in modo da aumentare il valore di campo impulsivo che si richiude attraverso la C_X della cella.

La linea orizzontale nella parte alta della Figura 5.12 rappresenta invece il conduttore. Questo è anche usato come elettrodo di alta tensione (quello che nel precedente capitolo è chiamato "elettrodo

superiore” dato che si parlava di configurazione piana), la sua impedenza è considerata nulla nella zona di misura viste le corte distanze, viene poi inserita nella zona oltre lo schermo. Infine il conduttore termina con la connessione al generatore HVDC tramite la R_{limit} sopracitata.

Guardando lo schema si potrebbe pensare che ogni ramo trasversale dreni della corrente, ciò darebbe quindi un effetto di riduzione della tensione applicata al cavo e quindi un gradiente elettrico trasversale su tutto il conduttore. Nella realtà queste resistenze hanno dei valori molto grandi e le correnti di dispersione possono essere considerate nulle.

Visto l’entità di queste impedenze è giusto pensare che la parte interessata dal passaggio del campo impulsivo sia quella dei condensatori, infatti l’impedenza capacitiva è inversamente proporzionale alla frequenza della tensione:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.1)$$

Un impulso ha un contenuto in frequenza elevato, per questo motivo i condensatori sono visti dall’impulso come un’impedenza bassissima e quindi una via preferenziale. La condizione ideale sarebbe quella dove la totalità dell’impulso segue il percorso verde accoppiandosi in tutta la sua ampiezza con la capacità C_X .

5.3 I generatori HVDC

Lo scopo delle misure PEA è quello di valutare l’evoluzione della carica all’interno del materiale dielettrico quando questo è sottoposto ad un campo elettrico. Per simulare campi elettrici dello stesso ordine di grandezza di quelli a cui si trova ad operare il cavo, o addirittura maggiori, si usano dei generatori HVDC. Il principio di funzionamento di questi generatori è quello degli stadi duplicatori in cascata, ovvero il principio di Cockroft-Walton. Secondo questo metodo si mettono in serie degli stadi composti da condensatori e diodi, il tutto alimentato da una tensione in DC. Come si vede in Figura 5.15 l’alimentazione in AC viene applicata al primo stadio; la presenza di un diodo fa sì che solo una semionda possa passare e quindi caricare la capacità allo stesso valore della tensione di alimentazione. A questo punto all’uscita si avrà una tensione che è la somma della tensione d’alimentazione più quella del condensatore, cioè $2V_C$. Questa tensione va ad alimentare il secondo stadio che, funzionando come il primo, darà in uscita una tensione di $4V_C$ e così via.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

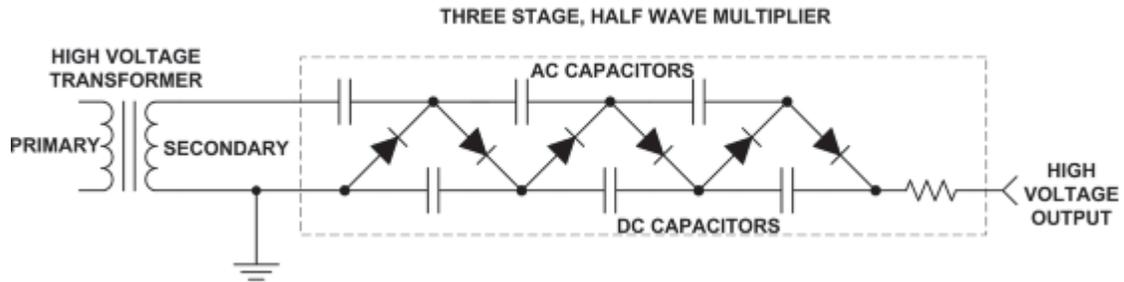


Figura 5.15
Schema circuitale di un generatore HVDC [10].

Per le prove nei cavi modello sono stati utilizzati dei generatori Spellman, mentre per le prove nei cavi full size sono stati sfruttati gli stessi generatori già utilizzati per il Type Test, quindi dei generatori HVDC delle High Volt (Figura 5.16).



Figura 5.16
Generatore HVDC High Volt, 4 stadi da 400kV l'uno, 1600kV tensione massima in uscita.



Figura 5.17
Generatore Spellman HVDC, 360kV tensione massima d'uscita.

5.4 L'oscilloscopio

L'oscilloscopio utilizzato è il Tektronix DPO 5034. Tramite l'oscilloscopio si va ad acquisire la forma d'onda generata dal trasduttore piezoelettrico. In Tabella 5.1 vengono elencate le principali caratteristiche dell'oscilloscopio.

Tektronix DPO 5034	
Ampiezza di banda	350 MHz
Sample Rate	5 Gs/s
Sistema operativo	Windows 7 64-bit

Tabella 1
Caratteristiche dell'oscilloscopio digitale.

Durante le prove i parametri di misura dell'oscilloscopio sono stati modificati per rendere i segnali acquisiti il più possibile puliti dai disturbi. Come prima cosa la banda passante è stata ridotta da 350 MHz a 20 MHz, in questo modo si eliminano tutti quei disturbi alle alte frequenze; tale variazione non influisce sulla qualità della misura in quanto le frequenze delle onde di pressione ricadono all'interno della banda di 20 MHz. Inoltre il segnale acquisito viene elaborato tramite media mobile per la quale si usano 1024 punti.

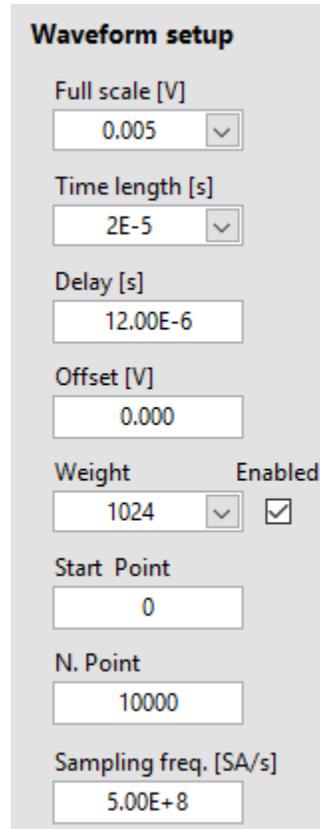
Come visto nel Paragrafo 5.2, il generatore d'impulso genera anche il segnale di trigger, questo viene collegato ad un ingresso dell'oscilloscopio e indica in quale momento deve essere fatta la misura.

Per acquisire il segnale, quindi dialogare con l'oscilloscopio, si è utilizzato il programma fornito dall'azienda produttrice. In Figura 5.18 è stata estrapolata la parte del programma nella quale possono essere impostati i parametri dell'oscilloscopio. Come si vede possono essere modificati sia la scala dei tempi che l'ampiezza del valore in ordinata. Si può operare sul numero di punti dell'acquisizione e sul valore di punti utilizzato per fare la media sopra citata (Weight). L'ultimo riquadro serve appunto per cambiare la frequenza di campionamento, questa può essere: 2.5 GHz, 1 GHz, 625 MHz, 500MHz o 250 MHz.

Infine il riquadro che indica il Delay serve per imporre il ritardo dal trigger dopo il quale viene graficato il segnale. Infatti, come spiegato nel Paragrafo 5.1, dal momento di iniezione dell'impulso al momento in cui il PVDF genera il segnale vi è un ritardo dovuto alla percorrenza dell'elettrodo di terra

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

da parte dell'impulso di pressione. Questo valore si è visto essere attorno ai 12 μs per i cavi full size, mentre è di poco più di 4 μs per i cavi modello.



Waveform setup

Full scale [V]
0.005

Time length [s]
2E-5

Delay [s]
12.00E-6

Offset [V]
0.000

Weight 1024 Enabled

Start Point
0

N. Point
10000

Sampling freq. [SA/s]
5.00E+8

Figura 5.18

Colonna del programma di acquisizione utilizzata per modificare le impostazioni di acquisizione e grafica del segnale da parte dell'oscilloscopio.

5.6 Programma per l'acquisizione dei dati

Di seguito verranno descritti i programmi utilizzati per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali relativi alla misura PEA. Questi sono stati sviluppati dalla azienda produttrice del setup e vengono forniti assieme al resto del setup per la misura di cariche spaziali. Tutti i Programmi sono stati realizzati con LabView, lo schema a blocchi del programma non è disponibile in quanto proprietà dell'azienda produttrice stessa, ma il principio di funzionamento è quello utilizzato da sempre per l'elaborazione di questo tipo di dati. Inoltre il Paragrafo si concentrerà nello spiegare come si utilizzano i programmi piuttosto che sulla logica che vi è dietro.

Il programma di acquisizione, Come già anticipato nel paragrafo precedente, comunica con l'oscilloscopio. La comunicazione avviene tramite linea ethernet che viene però disaccoppiata otticamente. Il disaccoppiatore ottico viene inserito per motivi di sicurezza, infatti si deve evitare che segnali di tensione possano uscire tramite conduttori elettrici dal recinto, questo perché in caso di guasto ci si potrebbe ritrovare con la sovratensione al di fuori della gabbia; una fibra ottica invece trasporta segnali ottici e, non essendo conduttore, non vi è il rischio di sovratensioni al di fuori del recinto.

Lo scopo principale del programma di acquisizione è, come dice il nome stesso, acquisire i dati graficati dall'oscilloscopio e salvarli in una memoria rigida. Inoltre si sfrutta questo programma in continuo dialogo con l'oscilloscopio per fornire i valori da impostare nel software che gestisce la graficazione del pattern. In questo modo all'apertura del programma viene fornito un pacchetto di informazioni all'oscilloscopio, queste informazioni impostano la parte di trigger e forniscono i parametri della finestra d'acquisizione; i secondi possono esser modificati variando i valori indicati in figura 5.18.

Il riquadro marrone riporta la dicitura *Waveform setup* ed è il riquadro contenente le etichette utilizzate per modificare il profilo del segnale acquisito.

Dall'alto verso il basso si hanno i comandi

- *Full scale*: serve per variare il valore del fondoscala delle ordinate
- *Time length*: serve per variare il valore del fondoscala delle ascisse
- *Delay*: ritardo al quale l'oscilloscopio inizia ad acquisire il segnale partendo dal segnale di trigger
- *Offset*: si inserisce un valore di tensione per centrare il segnale sullo 0 delle ordinate
- *Weight/enable*: è il valore di punti utilizzati per fare la media, disabilitando enable si esclude la mediazione dei valori ottenendo così il segnale grezzo
- *Start point* e *N point*: si può scegliere se acquisire tutta la finestra fornita dall'oscilloscopio o se salvare solo la porzione di segnale interessata; con questi comandi si può impostare da dove a dove il segnale deve essere registrato
- *Sampling freq.*: è la frequenza di campionamento con cui viene acquisito il segnale, questa può avere diversi valori in funzione dell'oscilloscopio (Vedi Paragrafo 5.4)

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

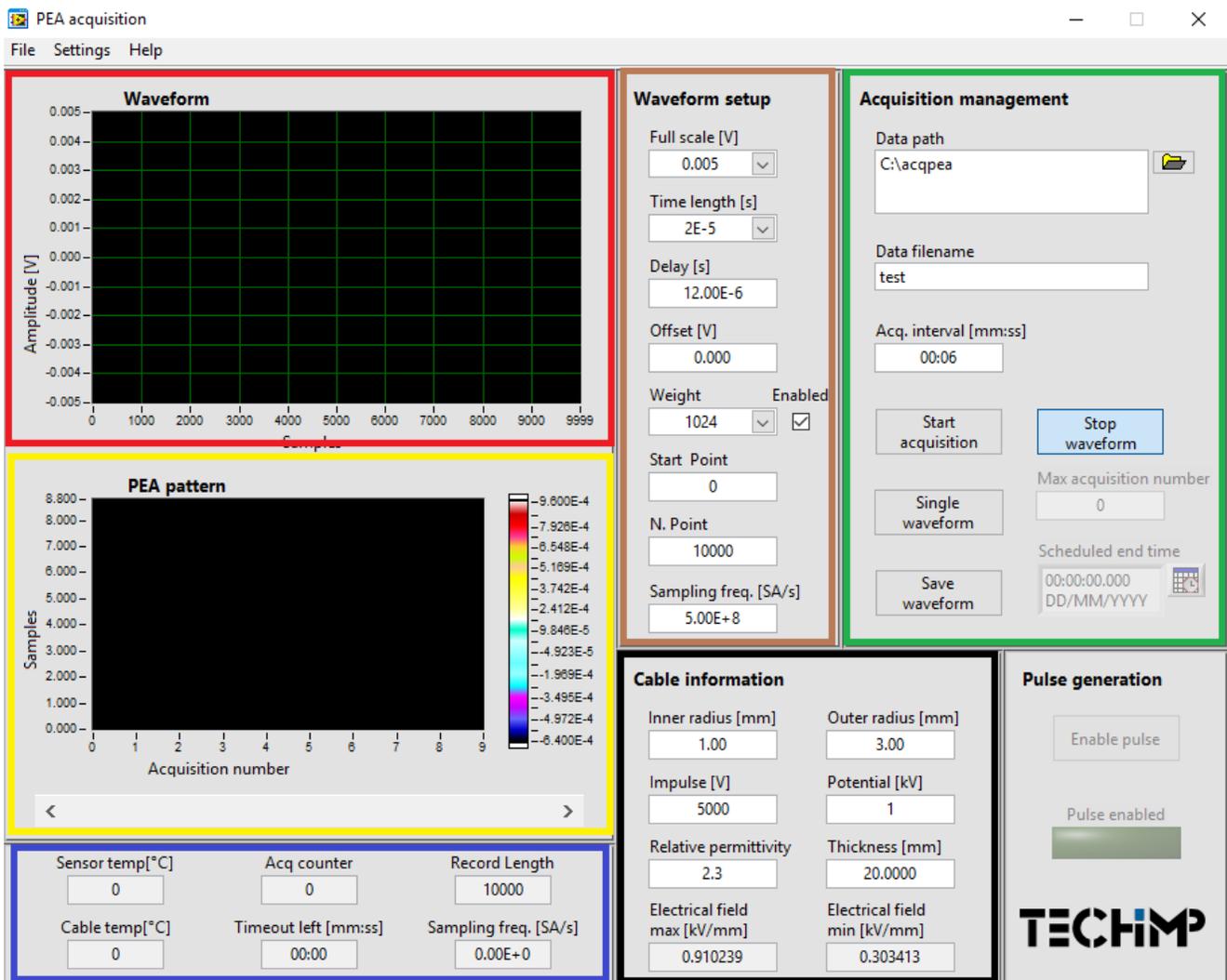


Figura 5.19
Schermata del programma di acquisizione

I riquadri rosso e verde sono contengono i grafici che descrivono l'andamento della prova e, quindi, danno una prima idea della distribuzione di carica spaziale. Come si vede in Figura 5.20 il pattern fornito dal *Waveform* presenta le sovralongazioni date dalla natura RC del circuito di amplificazione, e si ha un pattern che fornisce dei valori in Volt in funzione del numero del valore; si è quindi in una fase precalibrazione. Si nota il picco relativo all'elettrodo esterno, con un picco di segno opposto dato dalla natura del trasduttore, attorno al millesimo punto; il picco associato all'elettrodo interno è invece poco prima del settemillesimo punto, anch'esso presenta la tipica riflessione di segno opposto del picco.

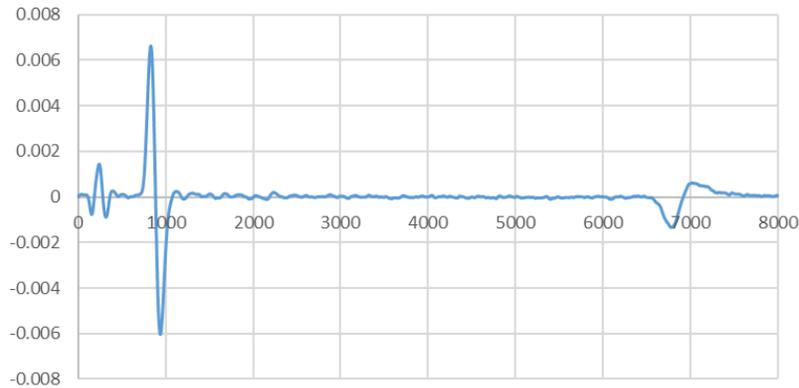


Figura 5.20

Pattern salvato tramite il programma di acquisizione, in questo caso sono stati memorizzati 8000 punti partendo dal punto 0.

Il grafico individuato dalla dicitura *PEA pattern* rappresenta invece una mappa tridimensionale del profilo di carica nell'isolante e la sua evoluzione nel tempo, la terza dimensione è data dalla scala dei colori. L'idea è quella di intensificare il colore nelle zone dove vi è più carica, dando così l'idea della distribuzione e accumulo di carica nella porzione di materiale dielettrico ispezionata. Nella realtà dei fatti questo grafico è creato partendo dalle successive acquisizioni come quella in Figura 5.20; come appena detto, però, l'acquisizione non è realistica, ma necessita di un'elaborazione che porta al reale profilo di carica in funzione dello spessore. Per questo motivo il grafico qui creato non è da considerarsi del tutto attendibile, se non per un'idea d'insieme, in maniera superficiale, dell'evoluzione del sistema.

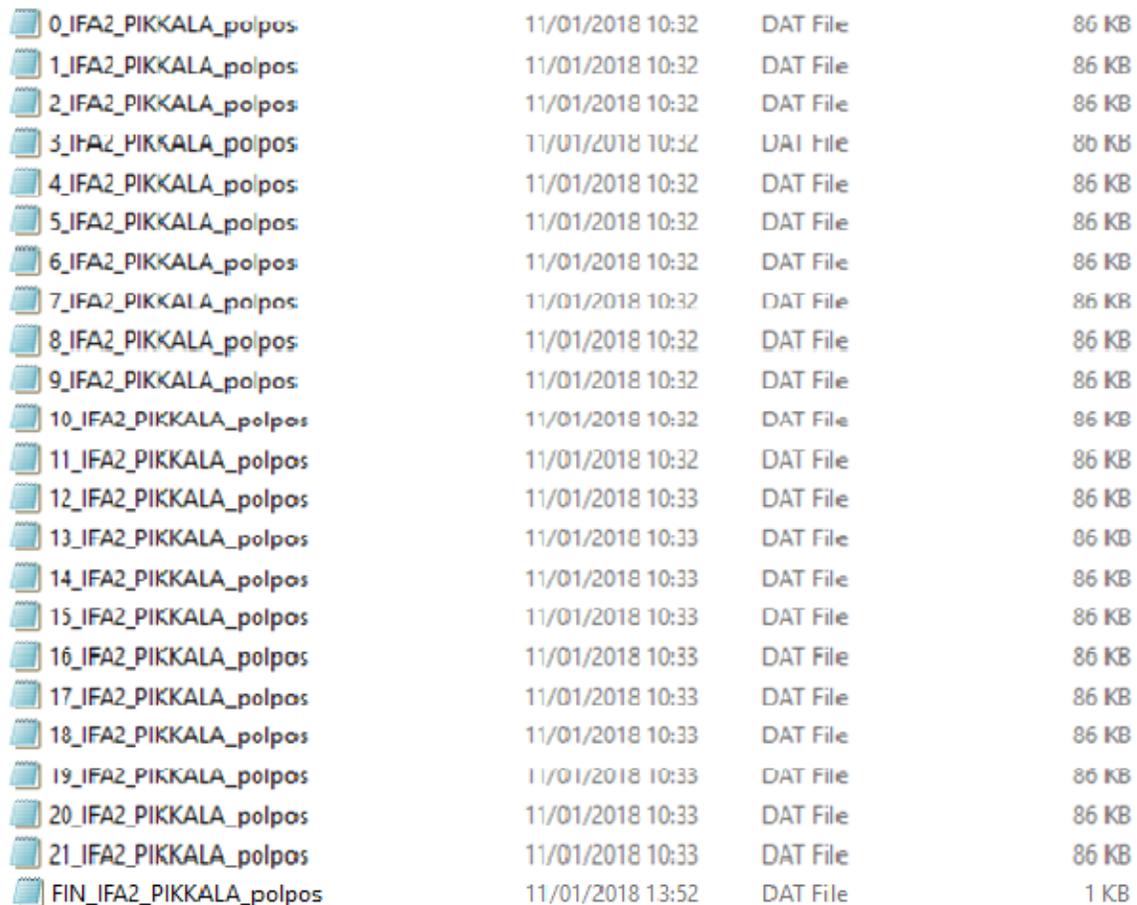
Lo stesso grafico verrà proposto in fasi di elaborazione dei dati. In tal caso potrà ritenersi attendibile in quanto il segnale di partenza utilizzato per la creazione del pattern sarà questa volta deconvoluto e calibrato.

Nel riquadro nero, come intuibile, devono essere indicate le informazioni del cavo (*Cable information*). Viene richiesto di inserire la permittività relativa del materiale isolante, inoltre sono necessari raggio esterno e raggio interno assieme alla tensione applicata, in modo da calcolare il campo elettrico medio nel materiale. Come verrà trattato nel Capitolo 8 nei calcoli di questi programmi il campo elettrico viene calcolato basandosi sul campo elettrico del condensatore piano, quindi un campo uniforme dato dalla relazione:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (5.2)$$

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

Il riquadro verde indicato con *Acquisition management* serve per definire i parametri di salvataggio del sistema. Questo programma gira su computer, quindi i file verranno salvati sulla memoria rigida del PC stesso, infatti la parte alta del riquadro serve per impostare il percorso di salvataggio ed il nome del file. La parte bassa invece contiene i pulsanti adibiti alla manovra sia automatica che manuale; vi è infatti la possibilità di fare acquisizioni singole tramite il pulsante *Single waveform*, questo fa sì che venga graficato nel *Waveform* il pattern, in caso si voglia salvarlo lo si fa con il tasto *Save waveform*. Gli ultimi due pulsanti sono invece dedicati all'avvio e al termine dei salvataggi automatici. Infatti, nel riquadro *Acq. Interval*, viene impostato il tempo d'attesa fra una acquisizione e l'altra; quando questo è fissato si pigia il bottone *Start acquisition* e il software inizia i salvataggi. Fra un salvataggio e l'altro il software attende il tempo deciso dall'utente e ad ogni step crea un file dati nella cartella designata; questi file verranno numerati automaticamente con un numero progressivo, come si vede in Figura 5.21.



0_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
1_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
2_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
3_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
4_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
5_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
6_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
7_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
8_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
9_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
10_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
11_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:32	DAT File	86 KB
12_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
13_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
14_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
15_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
16_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
17_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
18_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
19_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
20_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
21_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 10:33	DAT File	86 KB
FIN_IFA2_PIKKALA_polpos	11/01/2018 13:52	DAT File	1 KB

Figura 5.21

File di salvataggio creati dal software.

I file creati sono dei file dati nei quali vi è una colonna contenete i valori di ogni punto del grafico di Figura 5.20. Nel momento in cui si decide di terminare la prova, l'azione del pulsante *Stop waveform* crea un ultimo file che viene posizionato alla fine dell'elenco. Questo file è appunto detto file "Fin" in quanto contiene al suo interno tutti i dati che caratterizzano la prova. Come si vede in Figura 5.22, oltre ai dati inseriti dall'utente, come i raggi, il campo elettrico ecc., vengono anche memorizzati i dati impostati per l'oscilloscopio durante la misura.

```

File Edit Format View Help
|acquisitions      76.000000
radius_in         1.000000
radius_out        3.000000
electrical_field   0.910239
impulse 7000.000000
epsilon 2.300000
thickness         20.000000
sampling_freq     625000000.000000
potential         1.000000
full_scale        0.005000
time_length       0.000020
trigger 1.000000
delay 0.000012
offset 0.000000
weight 1024.000000
bandwidth         20 MHz
coupling          DC
impedance         50 Ohm
start_point       0.000000
total_point       8000.000000
final_time        11/01/2018 12:52:06
comment ""

```

Figura 5.22

File "Fin" contenente il riassunto delle caratteristiche della misura.

Infine il riquadro blu contiene i dati live della prova, ovvero i dati sull'acquisizione, temperatura (in caso si disponessero delle termocoppie) e il numero di acquisizioni effettuate.

5.7 Programma per l'elaborazione dei dati

I dati acquisiti durante la prova devono essere opportunamente elaborati per fornire reali informazioni sulla dinamica e sui meccanismi di accumulo della carica spaziale. Il segnale registrato, infatti, deve essere convertito da una tensione funzione del tempo ad una densità di carica funzione della posizione nel campione. Inoltre è necessario eliminare la deformazione introdotta dall'accoppiamento trasduttore-amplificatore. Per questi motivi si utilizzano due programmi atti a svolgere le suddette operazioni.

Le principali operazioni del programma di elaborazione sono:

- l'implementazione della funzione di trasferimento necessaria ad eseguire la deconvoluzione dei dati (cioè l'eliminazione della deformazione)
- la calibrazione del segnale (trasformazione del segnale tensione-tempo nella corrispondente distribuzione di carica spaziale nel provino)
- il calcolo del campo elettrico e della tensione reali (dovuti alla distribuzione di carica spaziale)
- la visualizzazione dell'evoluzione nel tempo della carica spaziale (mediante un pattern come quello descritto per il programma di acquisizione)

Per elaborare i dati ottenuti dal paragrafo 5.6 bisogna seguire un determinato procedimento per poter arrivare ai risultati richiesti dai punti qui sopra.

In primo luogo si individua il segnale sul quale si farà la calibrazione, questo dovrà essere un segnale acquisito ai primi istanti della prova, quando si è sicuri che non vi sia alcuna carica all'interno del materiale dielettrico. Questo implica che nel momento in cui viene energizzato il cavo è necessario fare numerose acquisizioni in serie, in tal modo si ha memorizzato il pattern in cui il cavo ha raggiunto la tensione di prova, ma ancora non vi sono stati fenomeni di iniezione o dissociazione. Per far ciò si può agire sulla finestra *Acq. Interval* della Figura 5.19, si imposta un intervallo di acquisizione relativamente corto in modo da avere un fitto numero di acquisizioni comprendenti quella per la calibrazione. Scelto questo segnale lo si va ad inserire nel programma *Calib* la cui interfaccia è mostrata in Figura 5.23.

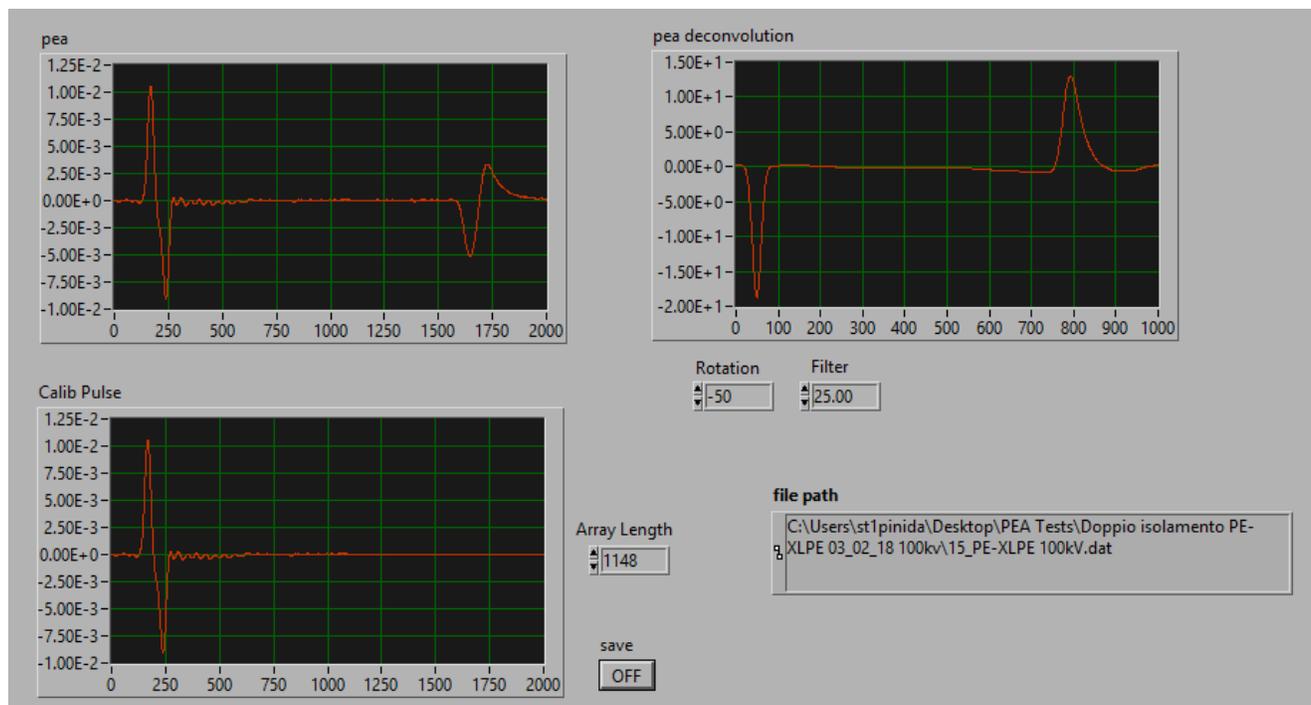


Figura 5.23

Interfaccia del programma di calibrazione e deconvoluzione del segnale.

Le tecniche di deconvoluzione e calibrazione verranno spiegate in seguito, qui ci si limiterà a discutere il procedimento pratico per ottenere i risultati di interesse dalla misura.

Il file contenente i dati del pattern di calibrazione vengono inseriti nell'apposita direttrice e vengono graficati nel riquadro in alto a sinistra. La prima operazione viene fatta modificando il valore numerico all'interno della finestra *Array Length*. Questo indica il numero di punti considerati dall'algoritmo del programma per sviluppare la deconvoluzione, il numero esatto lo si capisce aumentando costantemente tal valore e osservando il grafico in alto a destra, indicato con *PEA deconvolution*. Il grafico deconvoluto subirà una deformazione continua intanto che si varieranno i punti dell'array per l'operazione, l'operazione si conclude quando si ottiene un pattern in cui la zona fra i due elettrodi è piatta, ciò sta ad indicare l'assenza di carica intrappolata nel dielettrico. A questo punto si centra il pattern in maniera da avere i due picchi ai lati del grafico, questo viene fatto manovrando la casella *Rotation*; infine si può variare la voce *Filter* per modificare la curtosità dei picchi, questo non può essere fatto indefinitamente in quanto, ad un miglioramento dei picchi, si ha un peggioramento del profilo della zona piatta.

Il file deconvoluto sarà quindi il file col quale si farà di seguito la calibrazione, questo viene però fatto come primo passaggio nel secondo programma di elaborazione.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

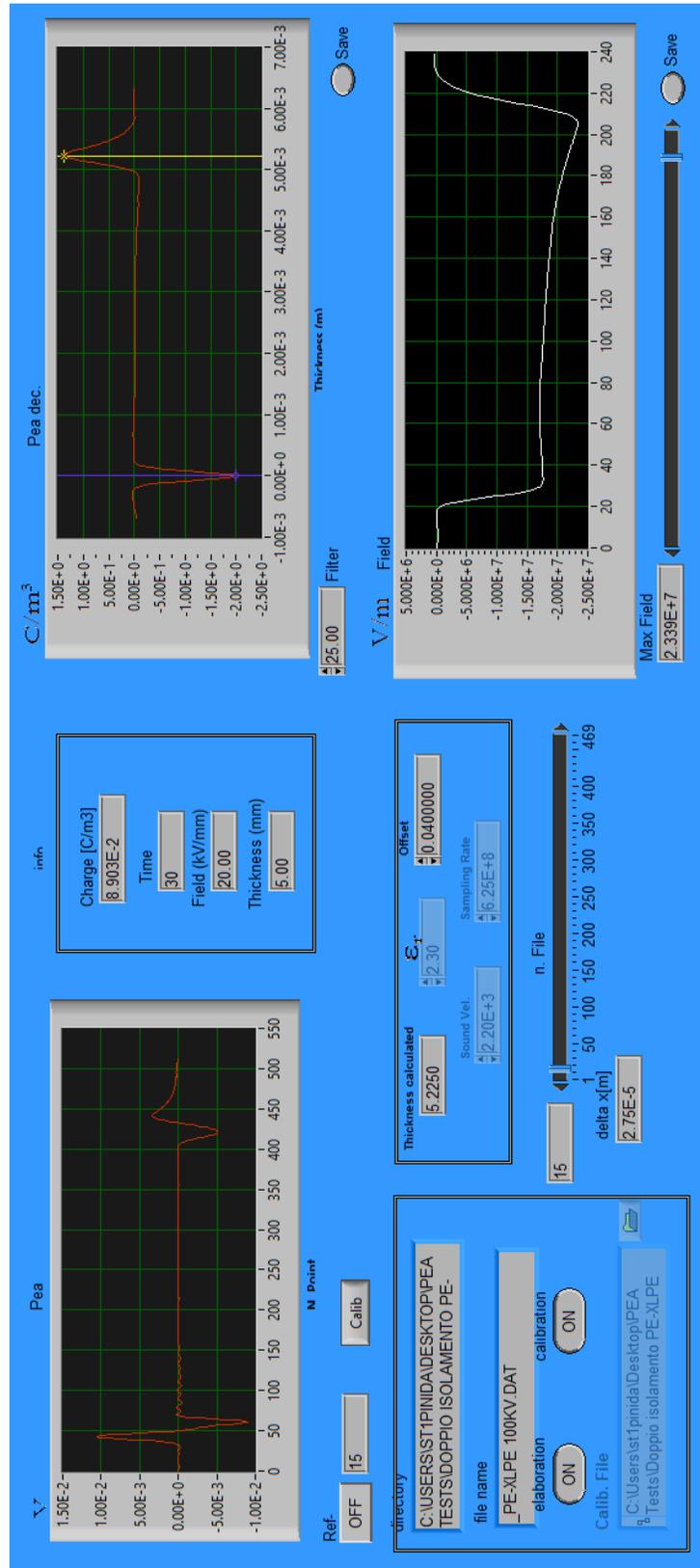


Figura 5.24
Interfaccia del programma di elaborazione dati PEA.

In questo programma il primo passaggio è quello di inserire i file guida per l'elaborazione dei dati; in particolare, nella tabella in basso a sinistra, va caricato il file deconvoluto e il file che nel paragrafo 5.6 è stato chiamato il file *Fin*. Una volta inseriti questi due file il programma caricherà automaticamente tutti i file salvati durante la prova; questo lo si vede nella barra indicata con *n. File*, nella quale vi è un cursore che può essere spostato per esplorare i vari pattern acquisiti. Ad ogni posizione del cursore si ha il corrispettivo pattern che viene graficato nel riquadro in alto a sinistra, inoltre si ha l'indicazione temporale del momento in cui è stata fatta la misura a partire dall'inizio della prova nell'indicatore *Time* nella casella delle *Info*. Il grafico appena citato non fa altro che riportare ancora una volta la rappresentazione di Figura 5.20, quindi si ha un segnale in *mV* in funzione del *numero dei punti*.

Nel riquadro centrale si hanno vari spazi in cui inserire i dati caratteristici del materiale e, di fondamentale importanza, il valore del *Sampling Rate* dell'oscilloscopio utilizzato per fare la misura. In questo modo il programma può mostrare il segnale deconvoluto, questo si ha nel riquadro in alto a destra. Questa volta il segnale darà l'indicazione richiesta dalla misura PEA, infatti si ha un segnale in C/m^3 in funzione dello spessore dell'isolante, quindi la direzione perpendicolare agli elettrodi.

Per ottenere il segnale di riferimento sul quale impostare la calibrazione, ci si riporta col cursore al medesimo segnale utilizzato nel programma precedente per la deconvoluzione. A questo punto si può modificare la posizione del segnale *PEA dec.* per averlo centrato nel grafico e si fa scorrere la barra sotto al grafico indicato con *Field*, in questo modo prende forma il campo elettrico calcolato in funzione dei dati impostati e del campo creato dalle cariche misurate all'interno del materiale. Per fare in modo che il grafico del campo parta e arrivi al valore 0 può essere necessario modificare il valore del *Offset*.

Sulla forma di questo grafico se ne discuterà ampiamente nel Capitolo 7.

Ottenuti quindi i due grafici si può ora impostare la calibrazione su questi parametri pigiando il pulsante *Calibration*. A questo punto si porta il cursore dei file al principio e si aziona il pulsante *Pattern* nella zona sottostante ai grafici finora menzionati.

Ora il programma scansionerà tutti i file in ordine temporale e disegnerà la stessa mappa 3D di cui si era parlato nel paragrafo 5.1, ma questa volta utilizzando dei file deconvoluti e sui quali è stata fatta una calibrazione. Si ottiene quindi un pattern che mostra l'evoluzione temporale della carica nel materiale, sia in fase di polarizzazione che in fase di depolarizzazione.

È importante evidenziare che l'evoluzione temporale del pattern non è fatta a incrementi temporali costanti; la prova inizia con un intervallo di acquisizione ridotto per vedere l'evoluzione temporale della

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

carica agli istanti iniziali, poi le acquisizioni diventano sempre più sporadiche fino a diventare ogni 10 minuti.

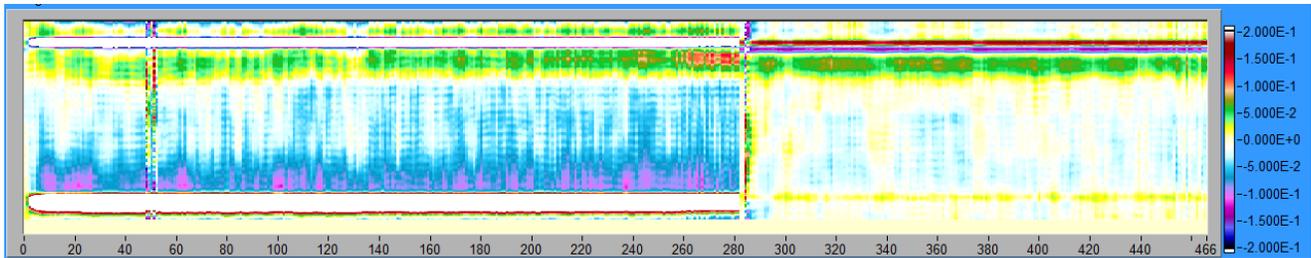


Figura 5.25
Evoluzione temporale del profilo di carica nel materiale dielettrico.

Nel pattern ogni pacchetto di dati è ottenuto dai valori graficati nel diagramma *PEA dec*. E poi riportato in maniera verticale nel riquadro di Figura 5.25. La legenda a destra mostra che ad ogni colore è associata una quantità di carica nel materiale. Le zone dall'azzurro al blu corrispondono alle zone di carica negativa, mentre le zone con carica opposta sono dal giallo al rosso. Si può quindi vedere l'evoluzione della carica e l'accumulo o il rilascio di questa nel materiale; un aumento dell'intensità del colore corrisponde ad un aumento della quantità di carica in quel punto e viceversa. Come per l'esempio in figura l'evoluzione può essere valutata sia in fase di polarizzazione che in fase di depolarizzazione, unendo tutto nel medesimo grafico si può avere proprio l'idea del transitorio delle cariche dalla condizione “*volt-on*” alla condizione “*volt-off*”. In questa tesi il pattern presentato in Figura 5.25 non verrà più trattato, se non in rari casi, in quanto le indicazioni fornite sono più per scopi di ricerca, a livello di affidabilità dei cavi il parametro che viene valutato è la variazione del campo elettrico.

Nella Figura 5.24 è messa in evidenza un'altra importante funzione del programma. La finestra contrassegnata con l'etichetta *Charge* comunica il valore medio della carica spaziale (assunta in valore assoluto) presente all'interno del campione. Gli estremi di integrazione per il calcolo di questa grandezza devono essere tali da non considerare la carica immagine presente sugli elettrodi.

La carica interna media fornisce una valutazione quantitativa della carica accumulata nel materiale durante la prova e soprattutto è un utile parametro con cui confrontare diversi materiali provati. La grandezza appena introdotta, inoltre, risulta di fondamentale importanza per dedurre la velocità con cui il materiale espelle la carica accumulata nel periodo successivo all'eliminazione della tensione, cioè in quella parte della prova solitamente indicata come *volt-off*, in cui il campione viene cortocircuitato.

Va detto già sin da ora che questi programmi sono stati progettati per provini piani, quindi considerando una geometria, appunto, piana. Finora le prove fatte su cavi sono state elaborate da questi

programmi; ciò è stato fatto secondo l'approssimazione che la parte dell'isolante del cavo ispezionata è una sezione minima e quindi le due facce agli estremi, cioè gli elettrodi, possono essere considerate parallele e il metodo approssimato a quello dei provini piani.

5.7.1 La calibrazione del segnale

Una volta ottenuto il segnale di tensione proporzionale alla distribuzione di carica spaziale, cioè quello in figura 5.20, occorre convertire il segnale da mV a C/m^3 , cioè calibrare.

La tecnica di calibrazione, implementata nel programma di elaborazione appena descritto, si basa sull'assunzione che al tempo zero non vi sia carica spaziale all'interno del materiale e che, quindi, il campo elettrico corrisponda a quello laplaciano. Ancora una volta si evidenzia che questa assunzione può essere considerata vera nei provini piani, è invece un'approssimazione nei provini cilindrici, cioè i cavi.

Applicando la tensione costante V al cavo si viene a creare all'interno del materiale dielettrico un campo laplaciano di ampiezza $E_L = V/d$, dove d è lo spessore dell'isolante.

L'oscilloscopio rileva un segnale in millivolt (mV), si considera quindi non un segnale che restituisce la grandezza misurata, ma una grandezza in *unità arbitrarie*. $\rho_{u.a.}$ è proporzionale al profilo di carica elettrica all'interno del materiale e alla carica sulle armature. Integrando tale segnale si ottiene una curva, in unità arbitrarie, proporzionale al campo elettrico reale; una volta calcolato l'andamento del campo in unità arbitrarie se ne calcola il valore medio. Rapportando il valore del campo laplaciano E_L (che rappresenta il valore medio reale in V/m) al valore medio del campo in unità arbitrarie, $E_{u.a.}$, si ottiene la costante di conversione K tra le u.a. e i V/m. Il procedimento è rappresentato graficamente nella Figura 5.26.

$$K = \frac{E_L}{E_{u.a.}} \quad (5.3)$$

Moltiplicando il campo elettrico in unità arbitrarie per la costante K si ottiene l'andamento del campo elettrico reale in V/m. Ottenuto tale andamento si può determinare la costante di calibrazione K_{calib} di conversione tra u.a. e C/m^3 .

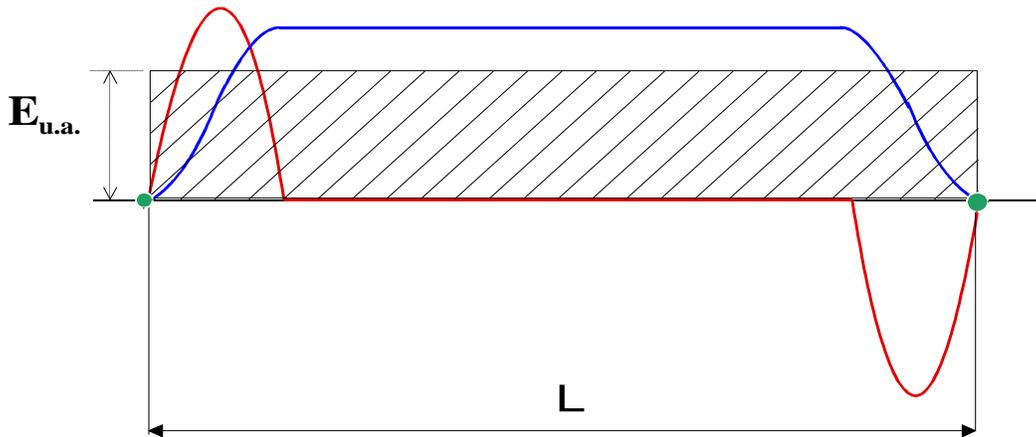


Figura 5.26

Esempio grafico della conversione tra V/m e u.a. (unità arbitrarie) [2].

La determinazione della costante K_{calib} per la calibrazione, viene fatta fissando una particolare lunghezza di integrazione L_2 , solitamente presa coincidente con la coordinata in cui il pattern (ora associato al campo elettrico) raggiunge il massimo: E_M . In Figura 5.27 è rappresentato il procedimento in maniera grafica. A questo punto si calcola il valor medio della caratteristica elettrica ρ_{L_2} in C/m^3 nell'intervallo precedentemente assunto. Il calcolo è fatto con l'equazione:

$$\rho_{L_2} = \frac{E_M \varepsilon}{L_2} \quad (5.)$$

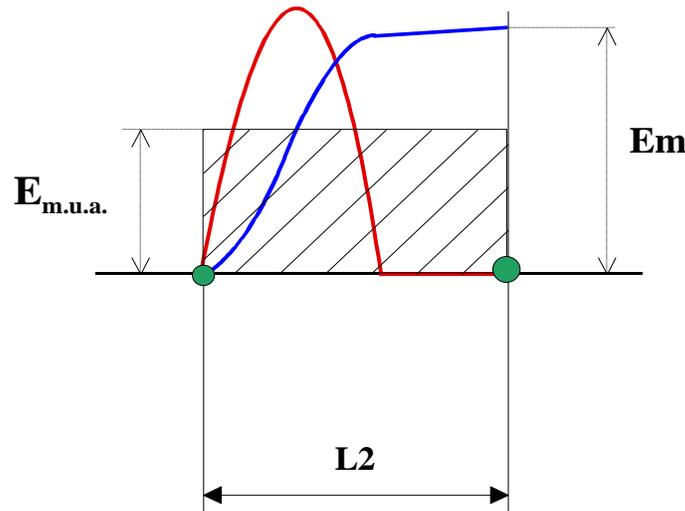
Nella relazione compare ε , cioè il valore della costante dielettrica del materiale.

Analogamente al valor medio della carica si calcola anche il valor medio della carica in unità arbitrarie $\rho_{u.a.L_2}$ nel medesimo intervallo in cui è calcolata la ρ_{L_2} . Si avrà la relazione:

$$\rho_{u.a.L_2} = \frac{1}{L_2} \int_0^{L_2} \rho_{u.a.} dz \quad (5.5)$$

Note le due grandezze ρ_{L_2} e $\rho_{u.a.L_2}$ è possibile determinare la costante di calibrazione come:

$$K_{calib} = \frac{\rho_{L_2}}{\rho_{u.a.L_2}} \quad (5.6)$$

**Figura 5.27**

Determinazione della costante di calibrazione tra C/m^3 ed unità arbitrarie tramite il calcolo dei valori medi di ρ_{L2} e $\rho_{u.a.L2}$ [2].

Moltiplicando il segnale per la costante di calibrazione, così determinata, è possibile ottenere l'andamento della densità di carica spaziale all'interno del materiale:

$$\rho(z) = K_{calib} \rho_{u.a.}(z) \quad (5.7)$$

5.7.2 Calcolo del campo elettrico Poissoniano e della tensione nota la distribuzione di carica spaziale

L'equazione da prendere in considerazione per arrivare al campo Poissoniano è la divergenza del campo elettrico, dalle leggi di Maxwell; inoltre, considerando il campo elettrico conservativo, lo si esprime come il gradiente del potenziale elettrico V .

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5.8)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (5.9)$$

Dalla 3.37 si evince che, una volta ottenuta la distribuzione di campo elettrico ρ , è facile risalire al campo elettrico E e in seguito al potenziale V , tramite la 3.39.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

Si ricorda che la misura PEA non fornisce informazioni nei piani perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda, ma solo nella direzione normale alla superficie degli elettrodi, quella che finora è stata indicata con z . In sintesi le rilevazioni fatte rappresentano il valore medio della carica distribuita nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, questo avrà la medesima area dell'elettrodo di terra. Si considera l'elettrodo di terra perché è quello che limita l'area essendo di dimensioni finite. L'elettrodo di alta, nel caso di prove su cavo, è il conduttore stesso, quindi la sua dimensione corrisponde alla lunghezza del cavo. Fatto questo ragionamento sulla direzione di misura e sulla superficie di valutazione, si può riscrivere le equazioni 3.37 e 3.38 appena proposte in una forma unidimensionale e di più facile interpretazione:

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho(z)}{\varepsilon} \quad (5.10)$$

$$E_z = -\frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (5.11)$$

Da queste equazioni si può quindi risalire al campo creato dalle cariche; per far ciò si integra la distribuzione di carica per ottenere il campo elettrico E_z , a sua volta verrà integrata per ottenere V_z .

$$E_z = \frac{\int_0^z \rho(z) dz}{\varepsilon} \quad (5.12)$$

$$V_z = -\frac{\int_0^z \int_0^z \rho(z) dz}{\varepsilon} \quad (5.13)$$

Nell'ipotesi di totale assenza di carica all'interno del campione si ha la situazione rappresentata in Figura 5.28; in rosso è riportato il profilo di carica, in blu il corrispondente andamento del campo e in verde l'andamento del potenziale. Il grafico riportato ha valenza puramente teorica ed è stato costruito ipotizzando una totale assenza di carica all'interno del campione dielettrico. In queste condizioni si ha che il campo elettrico all'interno del materiale coincide con il campo Laplaciano.

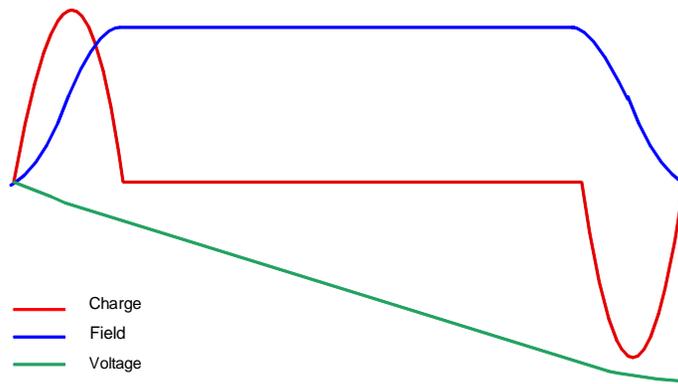
**Figura 5.28**

Diagramma riportante il profilo di carica, il corrispondente andamento del campo elettrico e della tensione, ottenibili nel caso di assenza di carica accumulata all'interno del materiale testato.

5.7.3 Deconvoluzione del segnale

Assumendo la funzione di trasferimento del sistema piezoelettrico-amplificatore come una funzione esponenziale e rilevando il segnale distorto in uscita dal sistema di amplificazione è possibile, attraverso un algoritmo numerico, riottenere il segnale in uscita dal trasduttore. Si vuole esprimere la funzione di trasferimento piezoelettrico-amplificatore $\phi(t)$ nel dominio dei tempi; per far ciò si usa la seguente relazione:

$$\phi(t) = \delta - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.14)$$

Dove δ è la funzione di Dirac e τ è la costante di tempo della risposta del piezoelettrico-amplificatore. Nella Figura 5.29 è graficato l'andamento della funzione di trasferimento $\phi(t)$.

Utilizzando la trasformata di Laplace si passa dal dominio dei tempi a quello delle trasformate, in questo modo si hanno numeri complessi indipendenti dal tempo e la risoluzione matematica della funzione risulta più semplice. Nel dominio di Laplace (o delle trasformate) si ha che la relazione ingresso-uscita è:

$$M(s) = R(s)\phi(s) \quad (5.15)$$

Dove $R(s)$ è il reale segnale prodotto dal trasduttore piezoelettrico quando viene investito dall'onda di pressione e $M(s)$ è il segnale distorto che viene prodotto all'uscita della coppia, quindi quello acquisito dall'oscilloscopio.

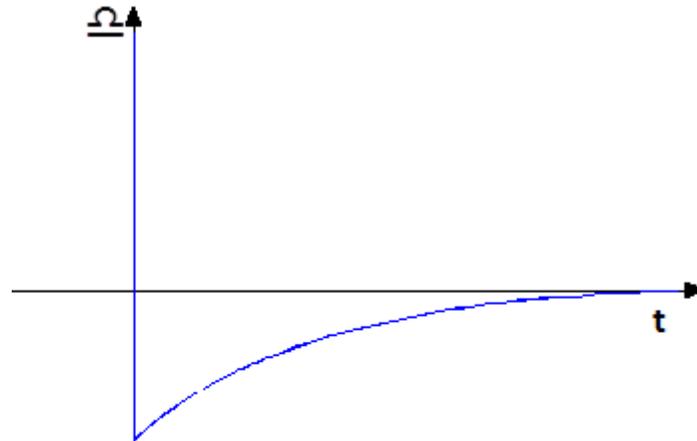


Figura 5.29
Funzione di trasferimento del sistema piezoelettrico-amplificatore [2].

Nel dominio dei tempi la relazione 5.15 può essere espressa all'istante generico t attraverso l'integrale:

$$M(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t')R(t-t')dt' \quad (5.16)$$

Ipotizzando un segnale nullo per $t < 0$, la 5.16 può essere riscritta modificando l'integrale.

$$M(t) = \int_0^t \phi(t')R(t-t')dt' \quad (5.16)$$

Il segnale misurato non è però continuo, infatti l'oscilloscopio ha una certa frequenza di campionamento e il segnale sarà quindi discreto; sotto queste ipotesi l'integrale può essere trattato come la sommatoria di termini finiti.

$$M(t) \cong \phi(0)R(t) + \phi(t_1)R(t-t_1) + \dots + \phi(t)R(0) \quad (5.17)$$

Essendo i tempi di campionamento dell'oscilloscopio costanti, ogni punto è diviso dal precedente e dal successivo da un intervallo temporale δ_t ; è quindi giusto vedere i vari intervalli come: $t_2 = t_1 + \delta_t$, $t_3 = t_2 + \delta_t = t_1 + 2\delta_t \dots$, $t_r = t_1 + r \delta_t$. Si può quindi esprimere la 5.17 come segue:

$$M(t_r) = \phi_0 R_r + \phi_1 R_{r-1} + \dots + \phi_r R_0 \quad (5.18)$$

Nell'equazione 5.18 il generico R_{r-n} corrisponde a $R(t_r - n\delta_t)$, mentre la funzione di trasferimento della coppia piezoelettrico-amplificatore $\phi(t)$ è espressa in forma discretizzata nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -\exp\left(-\frac{\delta_t}{\tau}\right) \\ \phi_2 &= -\exp\left(-\frac{2\delta_t}{\tau}\right) \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ \phi_r &= -\exp\left(-\frac{r\delta_t}{\tau}\right) \end{aligned} \quad (5.19)$$

Per semplicità si può scrivere la costante $-\exp\left(-\frac{\delta_t}{\tau}\right) = \Delta$; in questo modo la 5.19 diventa:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -\Delta \\ \phi_2 &= -\Delta^2 \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ \phi_r &= -\Delta^r \end{aligned} \quad (5.19)$$

Sono quindi stati definiti tutti i valori delle funzioni di trasferimento tranne quello della ϕ_0 che viene ottenuto attraverso la relazione:

$$\int_0^{\infty} \phi(t) dt = 0 \quad (5.20)$$

L'integrale di $\phi(t)$ è nullo per $t \rightarrow \infty$ in quanto l'accoppiamento piezoelettrico-amplificatore distorce la forma d'onda del segnale proveniente dal trasduttore, ma non ne cambia l'area complessiva. Sottraendo la parte negativa della funzione di trasferimento all'espressione 5.20 si determina il valore della funzione di trasferimento all'istante zero.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati

Si ottiene quindi la relazione:

$$\phi_0 = - \int_0^{\infty} \left[-\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] dt = \tau \quad (5.21)$$

Risulta quindi che ϕ_0 è numericamente uguale a τ , nonostante il secondo sia un numero puro. Generalmente il parametro ϕ_0 è assunto variabile e, nel programma realizzato per l'elaborazione, il valore può essere modificato dall'operatore. Dalle relazioni 5.19 e 5.21 segue che gli elementi di $[\phi]$ sono facilmente calcolabili. Noto il segnale distorto in uscita dal sistema di amplificazione è possibile ricavare il segnale reale a partire dalla 5.18 mediante le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} R_0 &= -\frac{M_0}{\phi_0} \\ R_1 &= \frac{M_1 - \phi_1 R_0}{\phi_0} \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ R_r &= \frac{M_r - \phi_1 R_{r-1} - \dots - \phi_r R_0}{\phi_0} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Le espressioni della 5.22 possono essere scritte in un'unica relazione, utilizzando la sommatoria.

$$R_n = \frac{M_n}{\phi_0} - \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i R_{n-i}}{\phi_0} \quad (5.23)$$

Come prima si assume $-\exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right) = \Delta$, allora si può esprimere $\phi_i = -\Delta^i$. Di conseguenza si ottiene:

$$R_n = \frac{M_n}{\phi_0} - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta^i R_{n-i}}{\phi_0} \quad (5.24)$$

Le relazioni ottenute sono implementate nel programma di elaborazione dati, nel quale $\varnothing_0 = \tau$ e Δ sono parametri modificabili dall'operatore in modo indipendente l'uno dall'altro. Essendo $-\exp\left(-\frac{\delta_t}{\tau}\right) = \Delta$, allora δ_t risulterebbe variabile. Nella realtà, però, δ_t è una costante. Questo grado di libertà è concesso artificialmente ed è necessario per bilanciare le approssimazioni, rispetto alla realtà sperimentale, introdotte inevitabilmente nella trattazione e che producono degli errori.

5. Apparato di misura ed elaborazione dati



REALIZZAZIONE DELLE MISURE PEA NEI CAVI MODELLO

Capitolo 6

Nel seguente capitolo si parlerà delle prove PEA svolte nei cavi modello, delle difficoltà incontrate e dell'interpretazione dei segnali registrati.

6. REALIZZAZIONE DELLE MISURE PEA NEI CAVI MODELLO

La produzione di un cavo per applicazioni HVDC è caratterizzata da vari gradini. In primo luogo vengono fatti i test sui materiali costitutivi per vedere se questi soddisfano le richieste sia di carattere elettrico che termico. Una volta stabiliti i materiali verrà prodotto un cavo modello, cioè un cavo che rappresenta quello di progetto, ma in scala. In tal modo è possibile fare delle prove sia di carattere elettrico che di carattere termico in una configurazione cilindrica. Quello che di solito è importante valutare nei cavi è il materiale dielettrico o, nel caso, l'accoppiata isolante-semiconduttivo. Per queste ragioni il conduttore dei cavi modello viene prodotto in alluminio.



Figura 6.1
Esempio di cavo modello.

Questi cavi hanno un diametro dell'ordine dei 20 mm e uno spessore dello strato isolante di circa 5 mm. Questi possono essere prodotti con o senza schermo, a seconda della funzione e del tipo di prova a cui verranno sottoposti.

Negli ultimi anni le misure di carica spaziale sono diventate sempre più richieste da chi acquista cavi, tant'è che nel 2017 è stata pubblicata la prima raccomandazione IEEE che tratta l'argomento: IEEE Std. 1732-2017 [3].

La probabilità di iniezione di carica nel materiale e la quantità iniettata sono strettamente dipendenti dal tipo di materiali utilizzati per lo strato semiconduttivo e lo strato isolante; per questo

6. Le misure PEA nei cavi modello

motivo si è pensato di utilizzare i cavi modello per le prove PEA in modo da caratterizzare le accoppiate migliori per la produzione dei cavi.

Nei cavi modello si hanno in gioco spessori degli isolanti molto minori rispetto ai cavi full size, questo fa sì che per aver lo stesso campo elettrico sul dielettrico sia necessaria una tensione applicata al cavo molto inferiore. Non dover gestire tensioni estremamente alte si traduce in un circuito di prova molto più semplice e duttile, se paragonato ad un circuito di un cavo full size; infatti i circuiti di test per cavi modello hanno una lunghezza di qualche decina di metri e terminali in olio di lino dalla semplice manovra. Per questo tipo di cavi la preparazione del setup di prova richiede una giornata di lavoro, contro alle settimane e al costo del materiale necessari per l'allestimento di un sistema di prova a dimensione reale.

Come prima cosa viene selezionato il campione da testare; è importante considerare le dimensioni delle teste, l'eventuale spazio necessario al posizionamento di trasformatori per il riscaldamento e lo spazio necessario per la misura.

Nel caso di un cavo con anche lo schermo, questo deve essere rimosso in una zona, circa a metà lunghezza, per una lunghezza necessaria e sufficiente per far la prova. Come si vedrà e come si ha avuto modo di capire nel Capitolo 5, l'apertura dello schermo influisce sui parametri del circuito equivalente d'impulso e quindi altera la risposta del sistema.

L'azienda produttrice del sistema PEA fornisce anche le indicazioni su come posizionare il setup di misura e sulle dimensioni degli spazi; seguendo queste linee guida si è fatta la prova su un cavo modello completo di schermo. Il risultato ottenuto dalla prova è graficato in Figura 6.2.

In questo caso si nota sin da subito che il pattern è notevolmente influenzato da disturbi, in particolare i disturbi vanno a sovrapporsi con i picchi relativi agli elettrodi e fanno sì che questi vengano distorti in maniera tale da non essere apprezzabili. In particolare si ha che, nel cerchio rosso, l'impulso relativo all'elettrodo di terra non sia il caratteristico segnale dato dal picco delle cariche seguito dalla sovraelongazione generata dall'amplificatore, ma un segnale con diversi picchi.

Il problema di questa condizione è che il programma di elaborazione non riesce ad individuare l'intervallo di integrazione per fare la calibrazione del segnale. Nel cerchio verde si ha invece il secondo picco, questo ha un'ampiezza simile a quella del rumore del segnale e quindi si perde fra le varie oscillazioni.

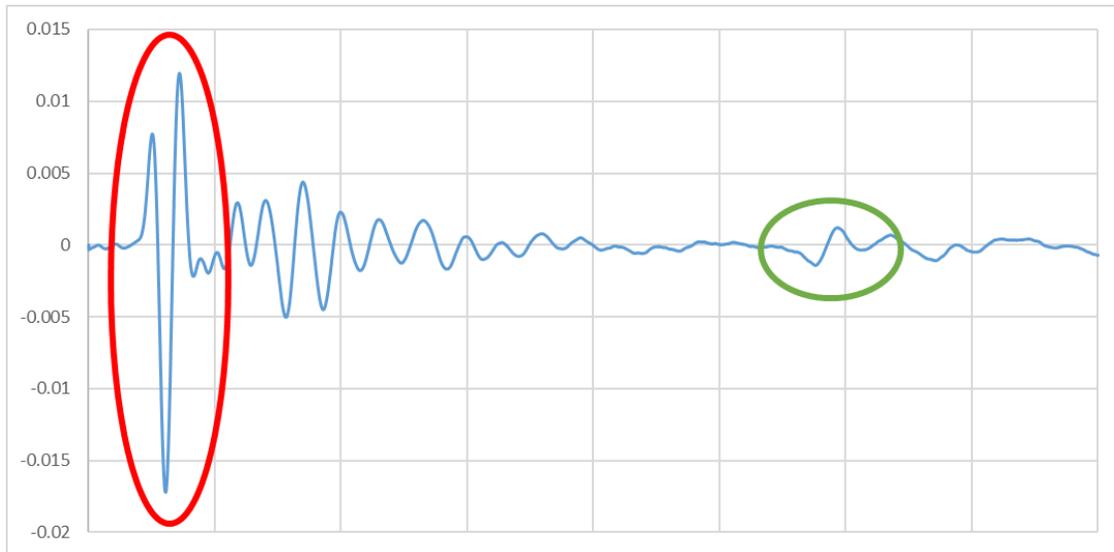


Figura 6.2
mV – N° punti
 Pattern della misura PEA per un cavo modello con schermo.

Partendo da questo segnale si è deciso di mettere in discussione le linee guida fornite dall'azienda produttrice per preparare il setup di misura e studiare se e quale configurazione potesse permettere la riuscita di una misura elaborabile.

Per fare ciò si è usato sullo schema in Figura 6.3, tale schema è già stato proposto nel capitolo precedente, qui verrà utilizzato per capire quali parametri modificare per ottenere un miglior risultato.

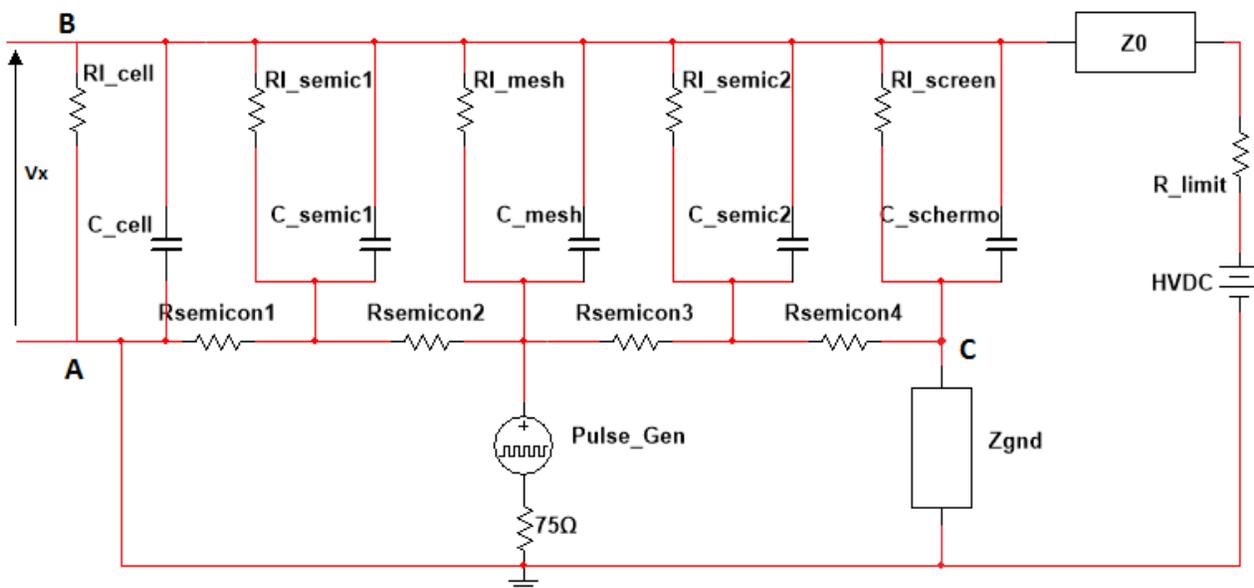


Figura 6.3
 Schema circuitale equivalente a parametri concentrati del percorso visto dall'impulso.

6. Le misure PEA nei cavi modello

Partendo da questa rappresentazione si è ragionato su quali parametri agire per poter massimizzare l'effetto dell'impulso sul provino dielettrico.

Di seguito si avranno diverse campagne di prova fatte su tipi diversi di circuito di misura, ognuna delle quali avrà delle modifiche rispetto a quella di partenza appena descritta e ognuna delle quali porterà a diversi risultati.

6.1 Test di misura su cavo a U

In letteratura si trovano diverse misure di carica spaziale su cavi modello. Analizzando il circuito utilizzato nelle misure si nota che solitamente il cavo in prova ha una lunghezza di qualche metro ed è privo di schermo; il cavo viene appeso a dei sostegni facendogli prendere una forma ad U e viene installata la cella nel punto più basso. Il conduttore viene poi collegato al generatore tramite le resistenze di limitazione,

C'è da sottolineare il fatto che spesso, in questi casi, i cavi sono ad uso esclusivo delle misure PEA e quindi vengono trattati in maniera da massimizzare la facilità di misura; questo, ad esempio, può essere la possibilità di utilizzare cavi senza semiconduttiva esterna, in modo da lasciare all'operatore la possibilità di inserirla solo nelle zone interessate dalla misura.

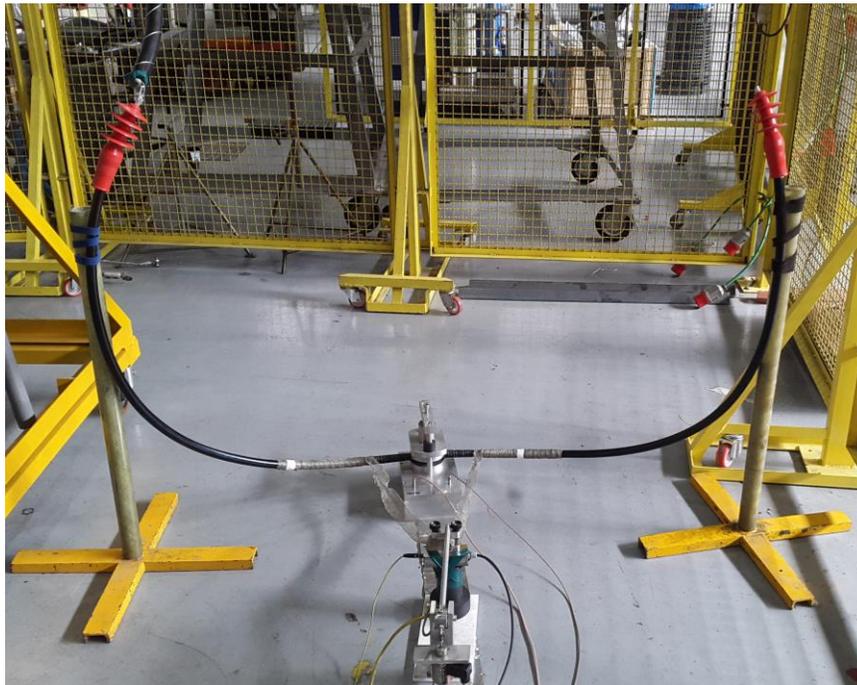


Figura 6.4

Setup di prova PEA in cavo di 2 m e terminali in aria.

Si è deciso quindi di riportarsi alle condizioni di prova utilizzate nei test di laboratorio. Per far ciò si è utilizzato un cavo modello della lunghezza di 2 m al quale è stato rimosso completamente lo schermo, si ha quindi un cavo composto da: conduttore, isolante e semiconduttivo interno ed esterno. Nel caso di seguito riportato si è deciso di non rimuovere lo strato semiconduttivo esterno per motivi pratici, quindi è stato necessario applicare dei terminali al cavo, in modo da non rischiare delle scariche fra semiconduttivo e conduttore in tensione.

Il circuito così ottenuto è quello osservabile in Figura 6.4.

In questo caso la configurazione PEA adottata è quella di posizionare la cella a metà lunghezza del cavo e arrotolare due calze metalliche ad una distanza da essa di 200 mm; le calze metalliche sono gli elettrodi che verranno utilizzati per iniettare l'impulso.

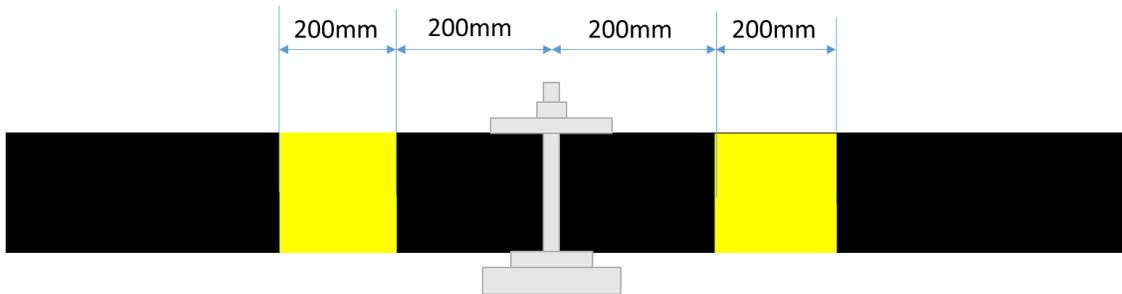


Figura 6.5

Grafico del posizionamento degli elementi nella prova descritta.

La prova così fatta non è esattamente identica a quelle svolte nelle ricerche universitarie, purché vicina si rifà anche ad una condizione ipoteticamente reale in cui un cavo è corredato sia di semiconduttivo esterno che di terminali.

Il risultato della prova lo si ha in Figura 6.6 e si ha il pattern acquisito, cioè un grafico che mostra il valore in mV del segnale in funzione del numero di punti acquisiti. Come prima cosa si distinguono i due picchi relativi alle cariche sugli elettrodi. La misura è stata fatta con il generatore Spellman in polarità positiva; la cella PEA per cavi modello ha l'elettronica di amplificazione che funziona con una logica invertente. Per questo motivo si ha il primo picco positivo, con rimbalzo negativo e il secondo negativo con rimbalzo positivo.

La Figura 6.6 è in pratica il pattern ideale per una misura di carica spaziale. Questo perché la linea tra i due elettrodi è al valor 0 ed è costante, in assenza di disturbi è quindi possibile valutare l'eventuale carica spaziale che si va a formare per poi calcolare la deformazione del campo.

6. Le misure PEA nei cavi modello

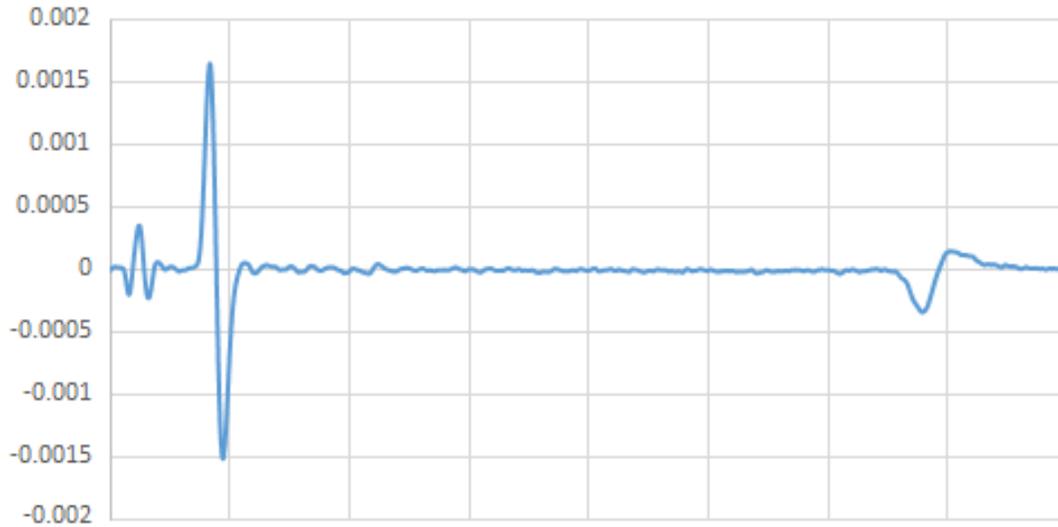


Figura 6.6

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 2 m, con terminali in aria, semiconduttivo su tutta la superficie esterna dell'isolante e tensione applicata di 50 kV.

Dopo essersi riportati al caso migliore per le misure PEA si è pensato di variare dei parametri per vedere il loro effetto sulla misura. Valutando la Figura 6.3 si è pensato di agire sulla capacità di accoppiamento dell'impulso con il cavo aumentando la dimensione delle calze avvolte sulla superficie esterna, si è andati ad aumentare quindi il valore della C_{mesh} .

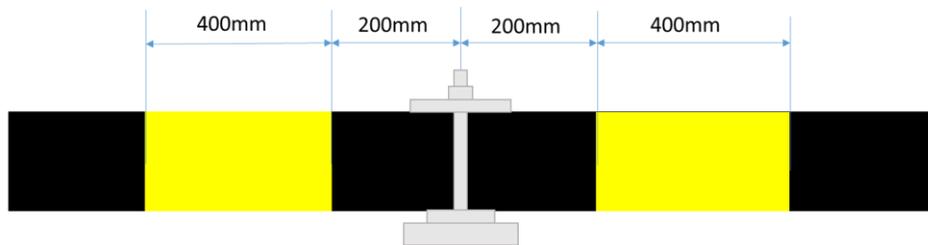


Figura 6.7

Elettrodi dell'impulso allungati, dimensione 400mm.

Questa modifica ha portato al risultato in Figura 6.8.

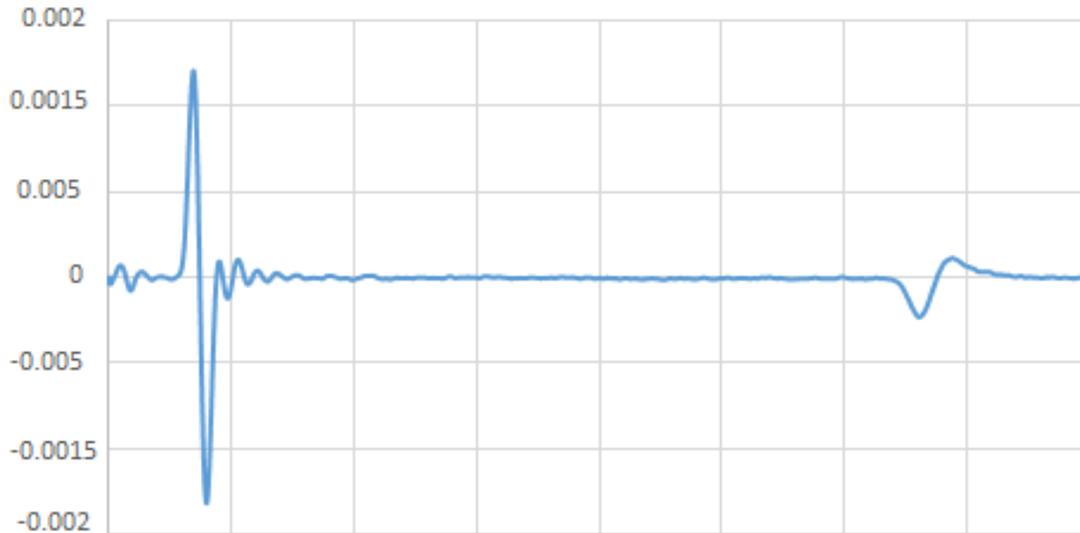


Figura 6.8

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 2 m, con terminali in aria, semiconduttivo su tutta la superficie esterna dell'isolante, elettrodi dell'impulso di 400mm e tensione applicata di 50 kV.

In questo caso si ha una perturbazione della zona subito dopo l'elettrodo di terra; questa è la zona di maggior interesse in quanto è quella con maggior sensibilità e dove si vede il maggior accumulo di cariche di spazio. Una distorsione così minima non influisce troppo sull'elaborazione dei dati, quindi la valutazione tramite la misura sarebbe comunque con una buona sensibilità.

Ottenute delle buone misure con questo setup si è pensato di modificare il sistema per renderlo più vicino alle condizioni di un cavo reale; viene aggiunto quindi lo schermo sopra lo strato semiconduttivo esterno. Non potendo riapplicare lo schermo sul cavo, sono state avvolte delle calze metalliche poi collegate a terra.

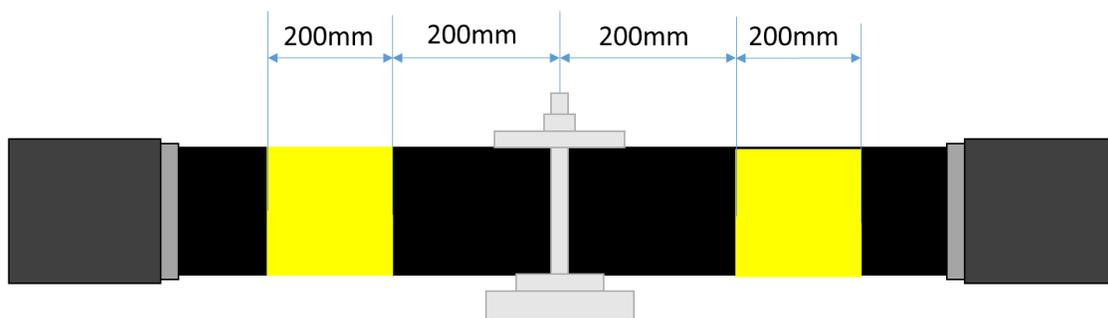


Figura 6.9

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso nell'apertura dello schermo.

Il risultato ottenuto è graficato in Figura 6.10.

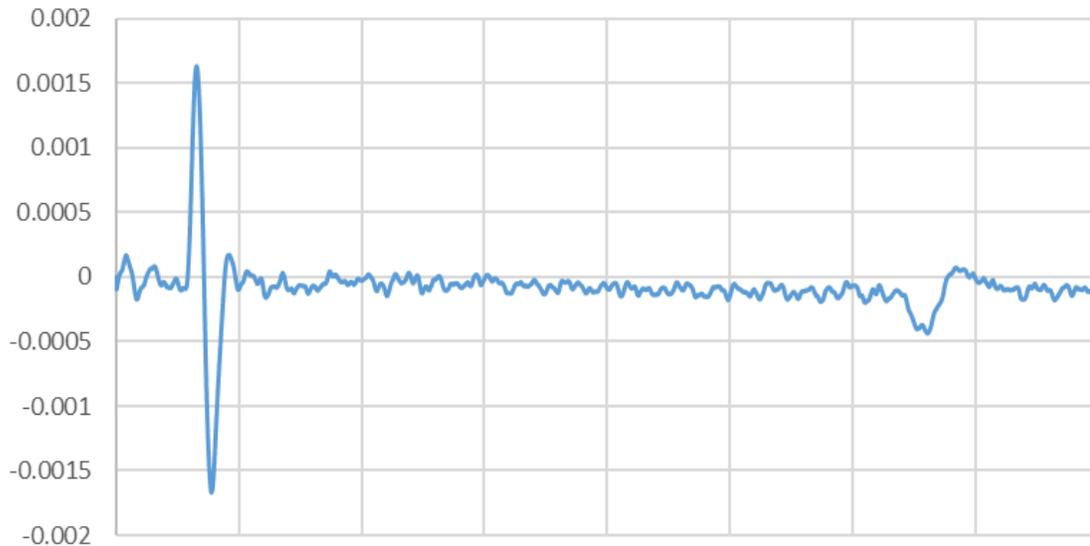


Figura 6.10

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 2 m, con terminali in aria, semiconduttivo ricoperto dallo schermo metallico, elettrodo dell'impulso di 200mm, presenza dello schermo e tensione applicata di 50 kV.

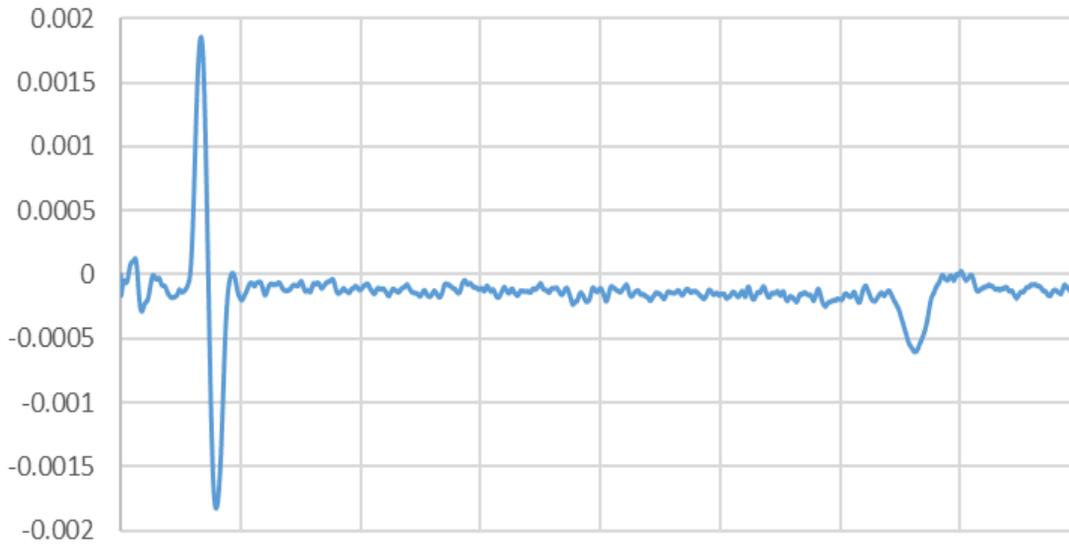
Si nota sin da subito un peggioramento del segnale dovuto a disturbi che si sovrappongono al segnale fondamentale. Tuttavia, questi disturbi vengono filtrati in fase di calibrazione e la misura risulta ancora indicativa per quanto riguarda la distribuzione di carica.

Si noti fra le Figure 6.6 - 6.8 - 6.10 come il valore dei picchi sia più ampio nel caso in cui si è ampliata la superficie degli elettrodi. Questo è spiegato dallo schema in Figura 6.3, infatti aumentando il valore della C_{mesh} si ha un maggior accoppiamento dell'impulso sul cavo e quindi una maggior eccitazione delle cariche all'interno del materiale.

Si vuole fare un ulteriore passo nella direzione della simulazione di un cavo reale, si aggiunge quindi uno strato di pellicola di terilene fra lo schermo e la semiconduttiva esterna del cavo.

Sempre in riferimento alla Figura 6.3 si può dire che questa modifica apporta un aumento della $R_{semicon4}$, dato che il collegamento fra schermo e semiconduttiva non è più diretto, ma vi è interposto il terilene.

La configurazione del setup rimane quindi quella della Figura 6.9. Il pattern ottenuto in seguito a questa misura è raffigurato in Figura 6.11.

**Figura 6.11***mV – N° punti*

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 2 m, con terminali in aria, semiconduttivo ricoperto dalla pellicola di terilene e dallo schermo metallico, elettrodo dell'impulso di 200mm, presenza dello schermo e tensione applicata di 50 kV.

Il segnale ottenuto in questa prova è analogo a quello in Figura 6.12, rimane quindi un segnale elaborabile. In più si ha la conferma dell'aumento della R_{semicon4} , in questo modo, infatti, l'impulso iniettato vede un'impedenza maggiore in direzione dello schermo, tenderà quindi a richiudersi maggiormente nei percorsi alternativi cioè attraverso l'impedenza capacitiva del cavo; il fatto che maggior parte dell'impulso passi attraverso l'isolante fa sì che le cariche intrappolate nel materiale siano maggiormente eccitate, quindi si ha una risposta maggiore in uscita dal piezoelettrico. Questo è verificato dal fatto che i picchi relativi agli elettrodi nella Figura 6.11 sono più ampi rispetto a quelli della Figura 6.10.

Un'ampiezza maggiore delle oscillazioni delle cariche è tradotta in una migliore risoluzione della prova, seguendo questa linea di pensiero si è pensato di estremizzare l'aumento della R_{semicon4} ; una resistenza infinita corrisponde ad un circuito aperto, quindi per eliminare la continuità sulla superficie esterna si è eliminata una porzione di strato semiconduttivo fra elettrodo dell'impulso e schermo del cavo.

In questa maniera, in riferimento allo schema in Figura 6.3, si può considerare R_{semicon4} infinita e il circuito aperto. Il parallelo R-C relativo allo schermo avrà quindi delle sollecitazioni impulsive solo se queste verranno trasmesse attraverso il conduttore e si richiederanno sulla terra.

6. Le misure PEA nei cavi modello

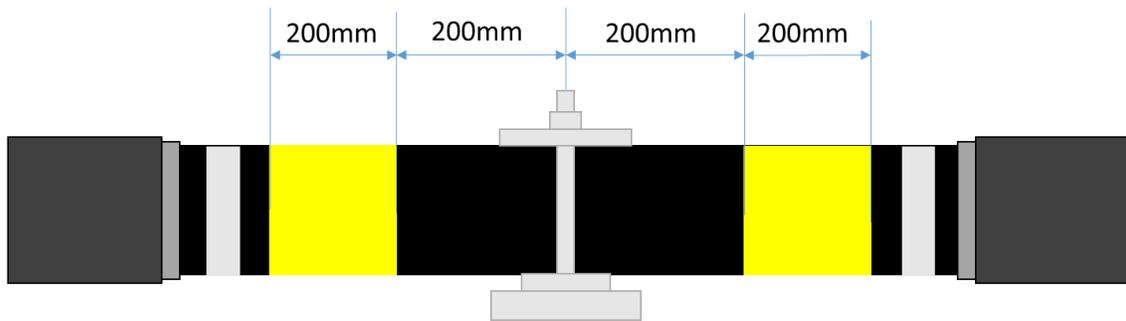


Figura 6.12

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso nell'apertura dello schermo, semiconduttivo rimosso fra l'elettrodo dell'impulso e lo schermo del cavo.

A parte la rimozione del semiconduttivo la restante parte del setup rimane uguale. La misura svolta in tali condizioni ha portato all'acquisizione del pattern in Figura 6.13.

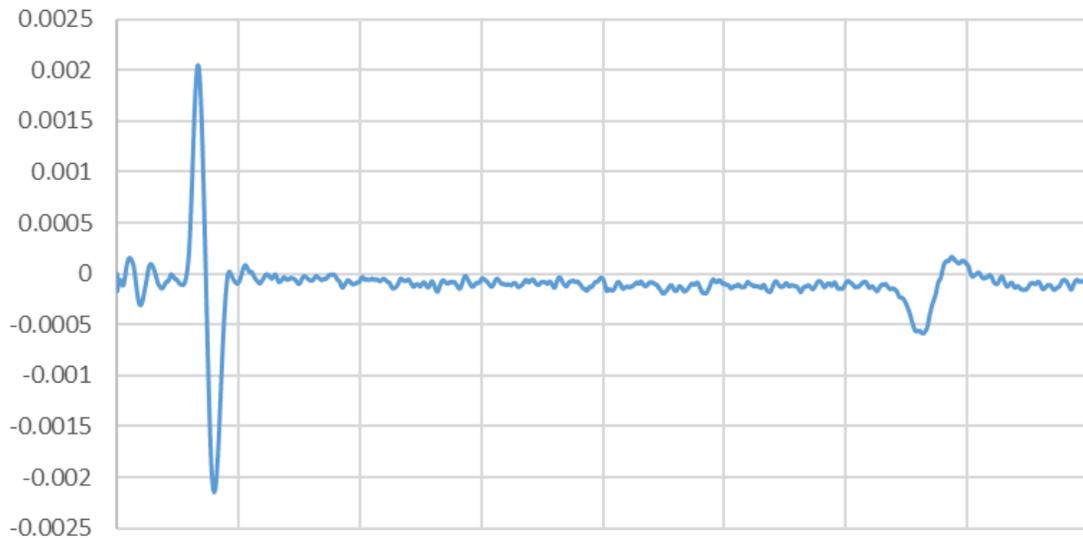


Figura 6.13

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 2 m, con terminali in aria, semiconduttivo ricoperto dalla pellicola di terilene e dallo schermo metallico, elettrodo dell'impulso di 200mm, presenza dello schermo, semiconduttivo eliminato fra schermo e elettrodo impulso, tensione applicata 50 kV.

Gli effetti della variazione del circuito sono del tutto analoghi a quelli della situazione precedente e si potrebbe ripetere il discorso appena fatto.

Ci si può però soffermare sugli aspetti negativi della configurazione. Infatti eliminare il semiconduttivo in una piccola sezione porta ad avere una discontinuità di campo elettrico proprio in quel

punto, questa discontinuità crea una concentrazione di campo e quindi un punto debole per l'isolante. Per questo motivo la rimozione di materiale semiconduttivo dalla superficie del cavo vuole essere evitata, infatti a campi elevati si rischia la scarica proprio in tal punto.

Per motivi di ricerca si è voluto però fare un ulteriore passo eliminando anche una sezione di semiconduttivo esterno fra l'impulso dell'elettrodo e la cella (questa è collegata a terra e costituisce un altro percorso per la richiusura dell'impulso).

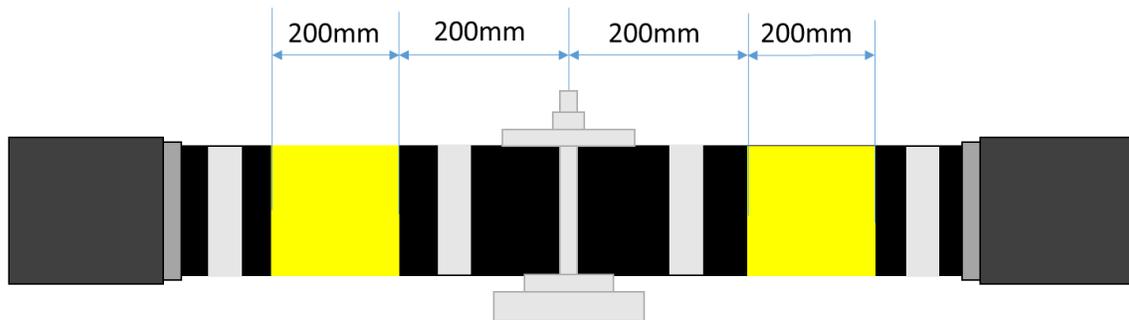


Figura 6.14

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso nell'apertura dello schermo, semiconduttivo rimosso sia a destra che a sinistra dell'elettrodo dell'impulso.

Sotto tali condizioni la misura ha portato al risultato in Figura 6.15.

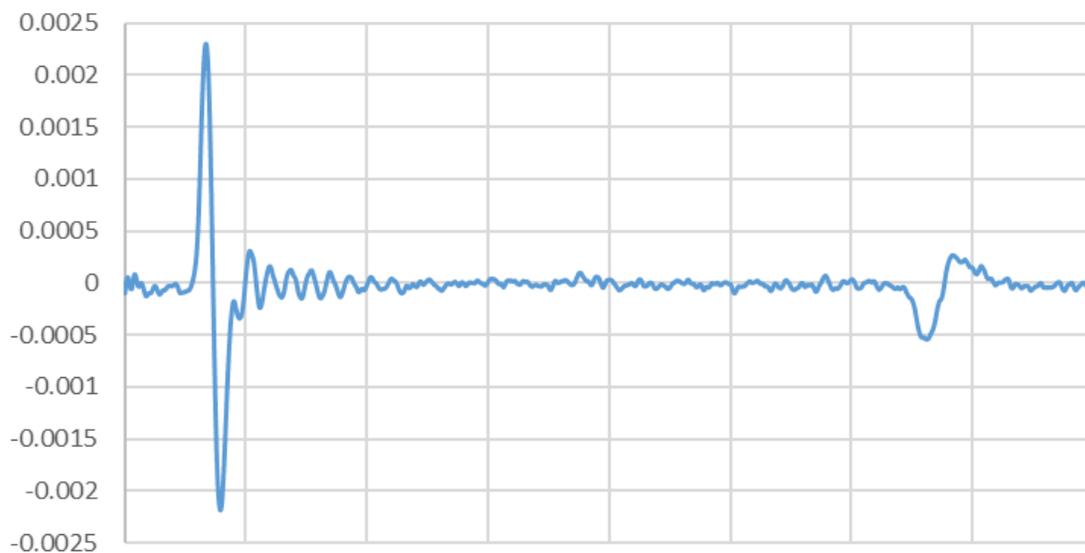


Figura 6.15

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 2 m, con terminali in aria, semiconduttivo ricoperto dalla pellicola di terilene e dallo schermo metallico, elettrodo dell'impulso di 200mm, presenza dello schermo, semiconduttivo eliminato agli estremi dell'elettrodo dell'impulso, tensione applicata 50 kV.

In questo caso il pattern ottenuto presenta sì una maggiore ampiezza dei picchi, ma vengono introdotte delle oscillazioni che perturbano il segnale. Come si nota in Figura 6.15 queste perturbazioni sono nella zona del segnale che corrisponde alla parte del dielettrico appena dopo l'elettrodo di terra; la letteratura insegna che questa è la zona più affetta dalla formazione di carica spaziale, avere un disturbo proprio in questa zona significa perdere la possibilità di valutare l'accumulo di carica.

Per quanto detto questa configurazione non è utile al fine di eseguire delle misure di carica spaziale.

Dopo lo studio del sistema con un cavo di 2 m piegato a U, replicando quindi le condizioni dei laboratori di ricerca, ci si è spostati in direzione di una condizione più simile ai circuiti reali. Nel paragrafo 6.2 verrà infatti trattata una configurazione con un cavo di 10 m e dei terminali in olio di lino.

6.2 Test di misura su cavo modello di 10m e terminali da 100 kV

A questo punto si è deciso di ingrandire il circuito per avvicinarsi sempre più alle condizioni del circuito che verrebbe nella realtà provato. Si è preso quindi un cavo della lunghezza di 10 m, ad esso sono state fatte le teste che sono state inserite all'interno di terminali in olio di lino, questi hanno una tenuta di circa 100 kV, quindi le prove sono state svolte ad una tensione di 80 kV.

Ancora una volta si è iniziata la campagna di prove con il setup più semplice, quello rappresentato dalla Figura 6.5, cioè un cavo senza guaina. Il risultato della prova è quello di Figura 6.16.

Il pattern ottenuto è un pattern con qualche oscillazione, queste vengono quasi completamente annullate durante le fasi di calibrazione e deconvoluzione del segnale; il problema del segnale è dato invece dal fatto che alle oscillazioni si sovrappone un disturbo con andamento esponenziale (Evidenziato nel cerchio rosso). Questo falsa la misura in quanto una tale variazione del segnale viene tradotta in presenza di carica e quindi distorsione del campo elettrico; cosa poco probabile in un provino vergine, all'inizio di una prova e con campo elettrico di circa 16 kV/mm.

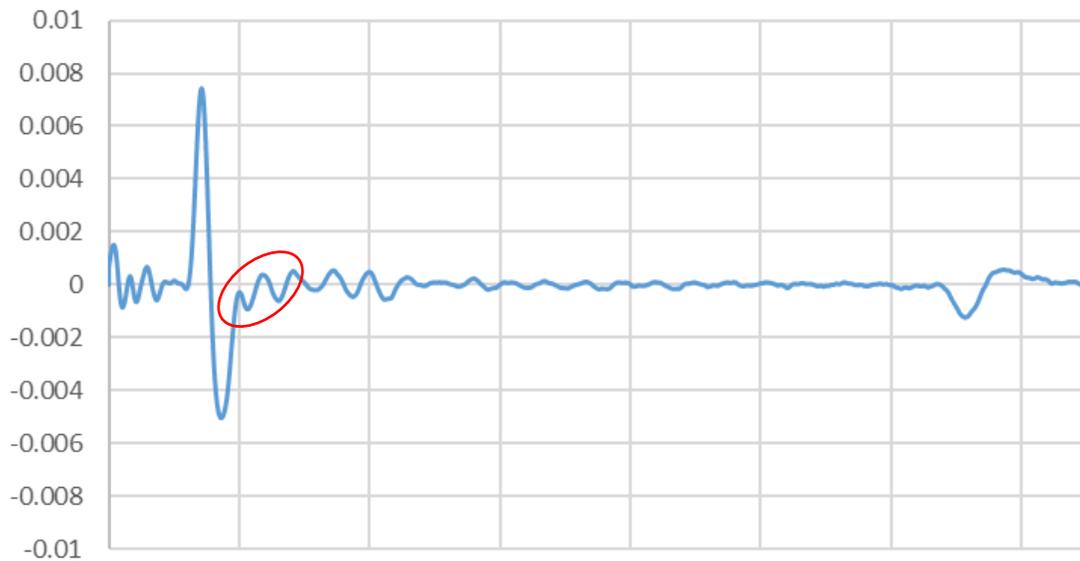


Figura 6.16
mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, solo semiconduttivo esterno, elettrodo dell'impulso di 200mm, tensione applicata 80 kV.

Si è quindi pensato di variare alcuni parametri della configurazione per cercare di eliminare il disturbo sopracitato. Come nel secondo caso del paragrafo 6.1 sono state allungate le calze-elettrodo per l'iniezione dell'impulso fino ad una lunghezza di 400 mm, la medesima condizione della Figura 6.7.

Il pattern ottenuto è quello in Figura 6.17.

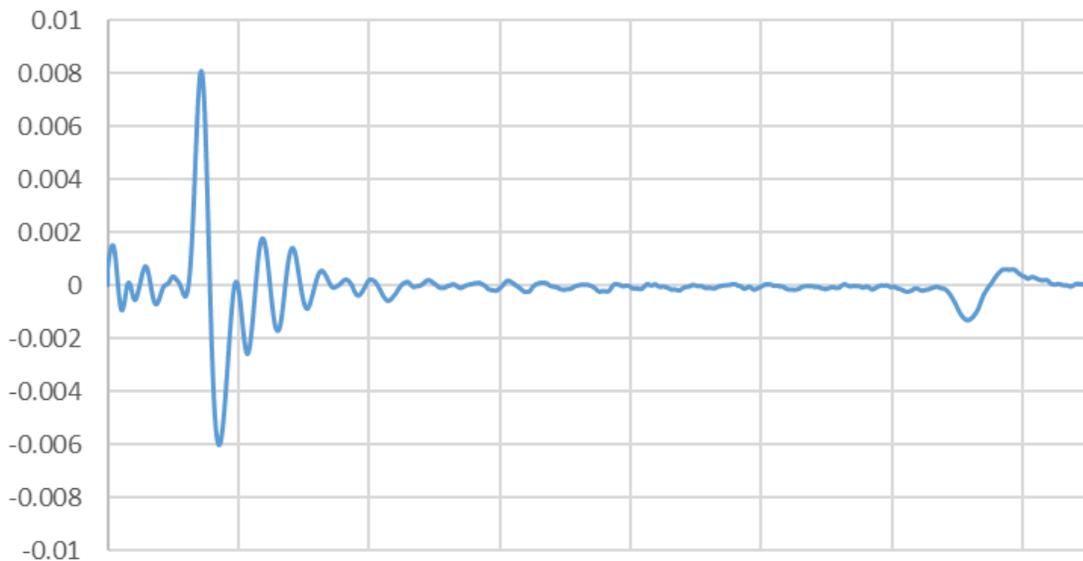


Figura 6.17
mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, solo semiconduttivo esterno, elettrodo dell'impulso di 400mm, tensione applicata 80 kV.

6. Le misure PEA nei cavi modello

Si può ben notare che questa misura ha un notevole peggioramento a livello di disturbi. Un maggior accoppiamento capacitivo dell'impulso con il cavo ha portato ad un'amplificazione dei picchi, oltre ai picchi è aumentato anche il valore sia del disturbo oscillante, che di quello esponenziale.

Appurato che la dimensione dell'elettrodo di iniezione dell'impulso agisce, più che altro, sull'ampiezza dei picchi, si è proceduto in direzione opposta, cioè diminuendo la lunghezza delle calze, ma variando la posizione delle stesse lungo la superficie del cavo.

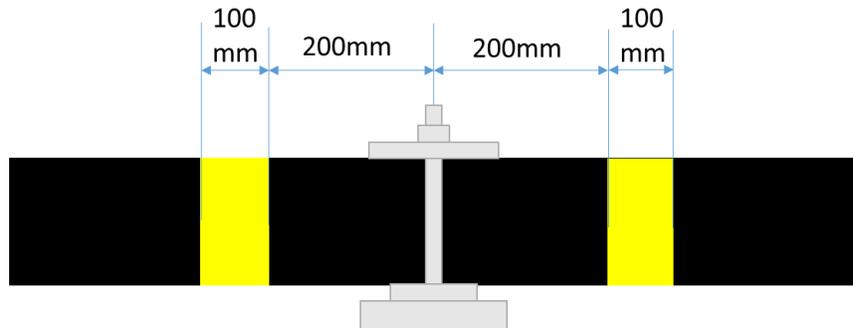


Figura 6.18
Cavo con cella PEA e elettrodi impulso di dimensioni 100 mm.

In questo caso si ha una forte riduzione dell'ampiezza dei picchi, come atteso, di contro si ha una notevole accentuazione del disturbo esponenziale.

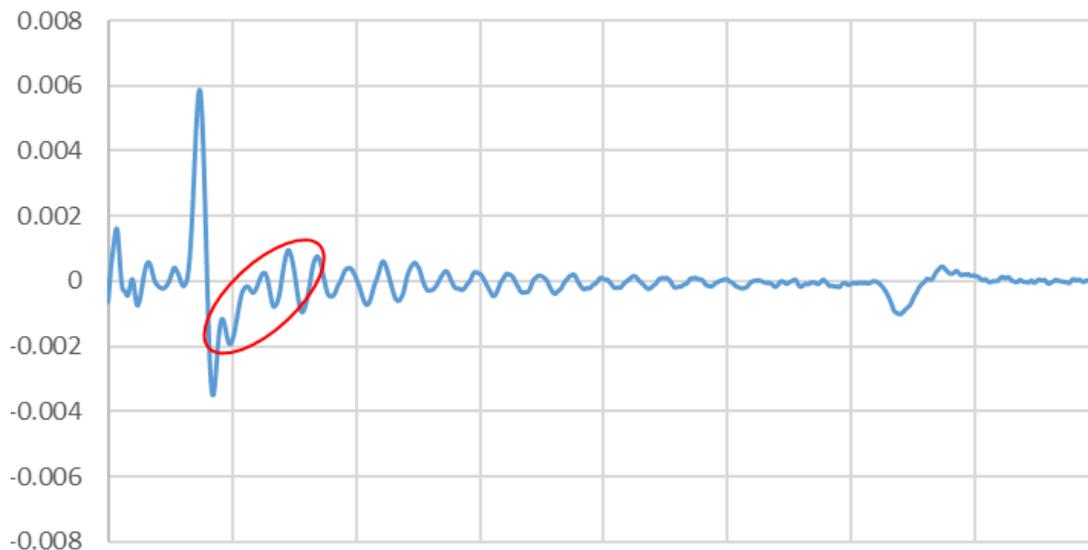


Figura 6.19
mV – N° punti
Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, solo semiconduttivo esterno, elettrodo dell'impulso di 100mm, tensione applicata 80 kV.

Questa condizione è assolutamente inaccettabile. Tale perturbazione darebbe come effetto una presenza consistente di carica nella parte di isolante vicina all'elettrodo, questo si tradurrebbe in un'enorme distorsione del campo, cosa decisamente improbabile.

Mantenendo la medesima configurazione si può pensare di aumentare la distanza elettrodo impulso-cella; riferendosi alla figura 6.3 si ha che questo porta un aumento della C_{semic1} , così come della R_{semicon1} , viceversa si ha una diminuzione del valore della RI_{semic1} . In Figura 6.20 si ha lo schema della configurazione adottata e in Figura 6.21 il pattern ottenuto dalla relativa misura.

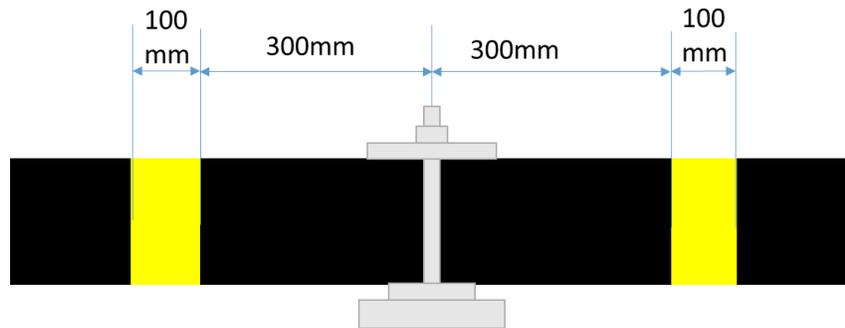


Figura 6.20

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso di dimensioni 100 mm a 300mm dalla cella.

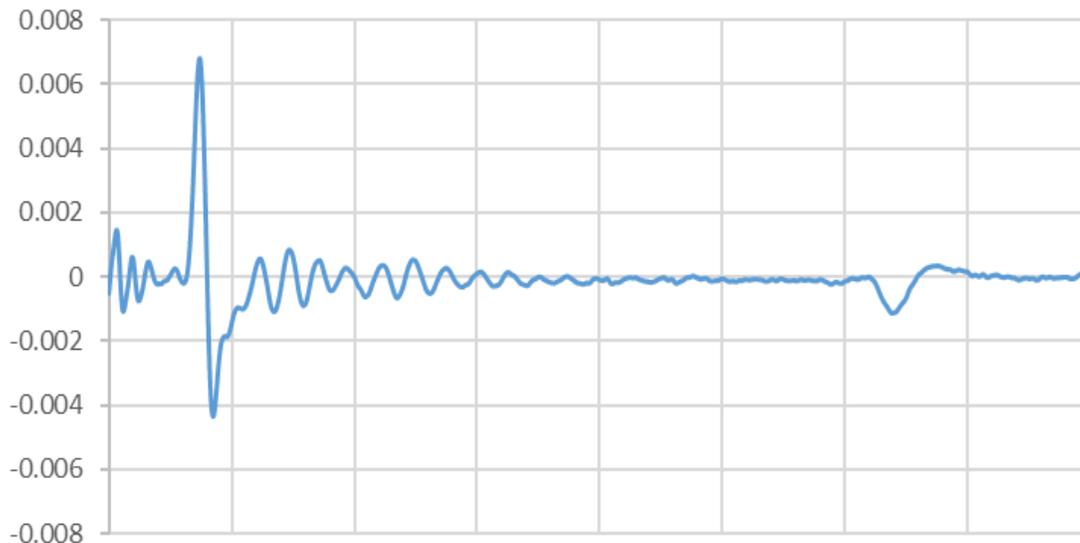


Figura 6.21

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, solo semiconduttivo esterno, elettrodo dell'impulso di 100mm a 300mm dalla cella, tensione applicata 80 kV.

In questa misura si è ottenuta una diminuzione dei disturbi, tuttavia, la zona di maggior interesse rimane coperta dalla distorsione esponenziale che falsifica una presenza di eterocarica.

6. Le misure PEA nei cavi modello

Visto che l'allontanamento dalla cella degli elettrodi dell'impulso ha apportato migliorie si continua in tale direzione. In Figura 6.21 si vede che la distanza dalla cella delle calze è di 500 mm.

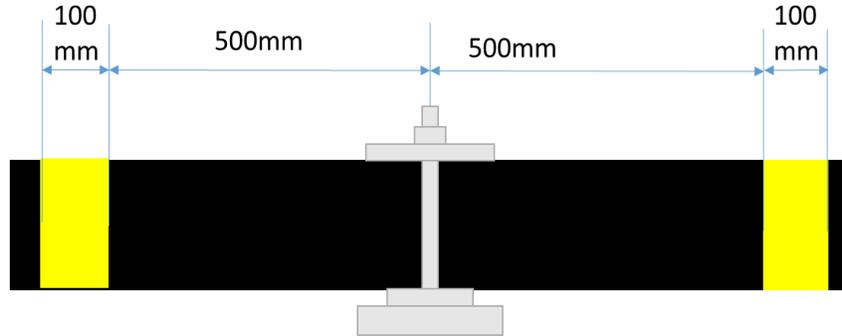


Figura 6.22

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso di dimensioni 100 mm a 500mm dalla cella.

La misura PEA è stata svolta allo stesso modo dei test precedenti ed il risultato ottenuto è in Figura 6.23.

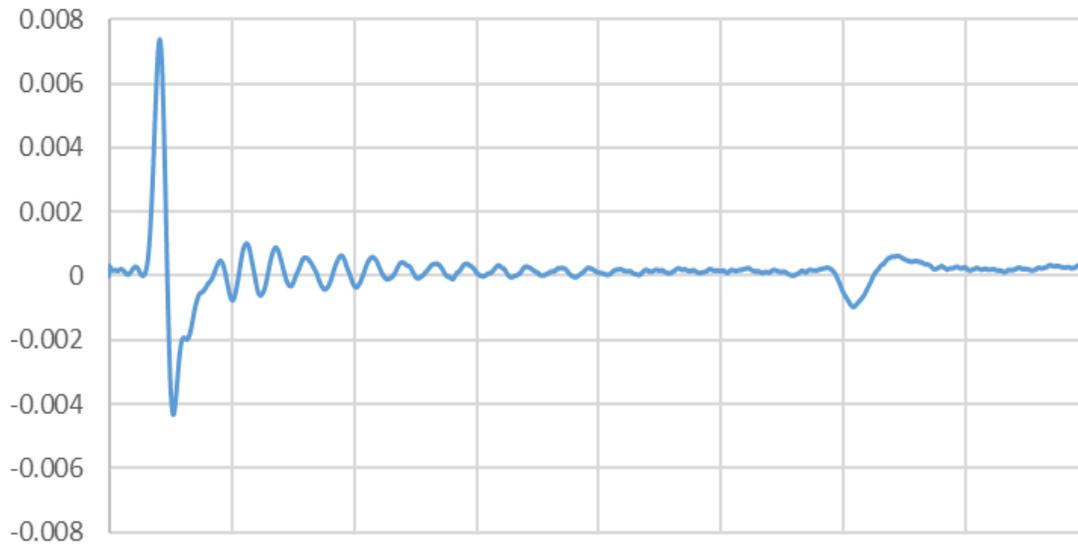


Figura 6.23

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, solo semiconduttivo esterno, elettrodo dell'impulso di 100mm a 500mm dalla cella, tensione applicata 80 kV.

In questo caso non si hanno sostanziali differenze con il pattern di Figura 6.21, l'unico effetto è quello di allungare la coda del disturbo oscillante.

Queste prove hanno evidenziato che, nonostante le posizioni degli elementi della di misura siano le medesime del paragrafo 6.1, le misure non corrispondono. Il risultato può essere spiegato con il discriminante fra le due prove, cioè la lunghezza del cavo. Entrano quindi in gioco l'induttanza tipica dell'impedenza caratteristica del cavo.

Per verificare che effettivamente i due cavi hanno effetti diversi sulla prova, si è svolta una misura PEA con l'iniezione dell'impulso solo su un lato rispetto alla cella (Figura 6.24) per il cavo utilizzato nel precedente paragrafo e nel cavo ora trattato.

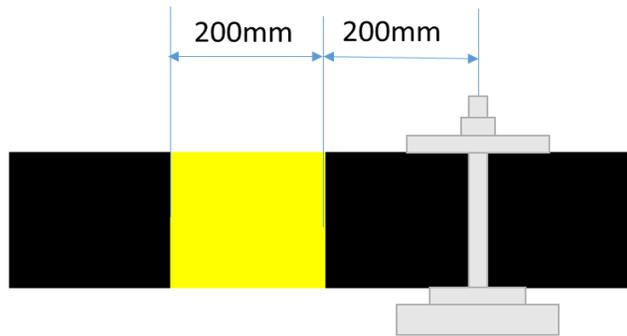


Figura 6.24

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso di dimensioni 200 mm da un solo lato della cella.

La configurazione appena mostrata ha portato a due risultati molto diversi per i due cavi. Le prove sono sovrapposte nel medesimo grafico in Figura 6.25.

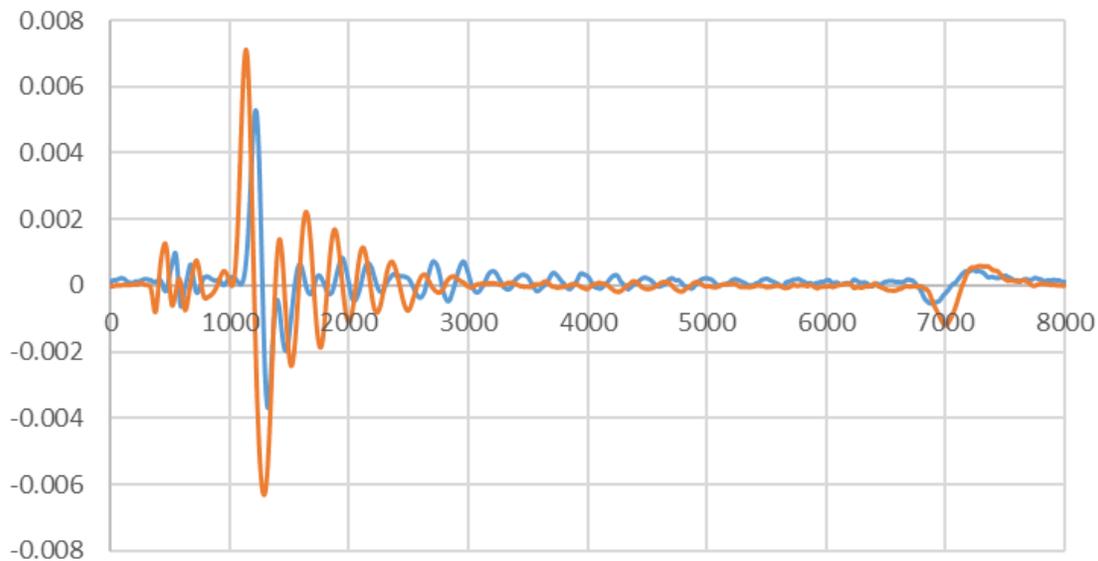


Figura 6.25

mV – N° punti

Pattern della misura PEA di confronto fra un cavo della lunghezza di 2m e uno di 10m, impulso iniettato da un solo lato della cella. Il segnale arancione è associato al cavo di 2m, quello blu al cavo di 10m.

6. Le misure PEA nei cavi modello

In figura 6.25 si nota che entrambe i segnali presentano un disturbo oscillante, ciò che li distingue è l'entità del disturbo esponenziale. Nel cavo di 10 m questo disturbo è così alto da creare un picco, subito dopo quello dell'elettrodo, di ampiezza circa il 40% del picco dell'elettrodo stesso.

Tuttavia se l'elettrodo dell'impulso viene allungato a dismisura, fino a 2m, il disturbo subisce una notevole variazione. Il risultato della misura è in Figura 6.27.

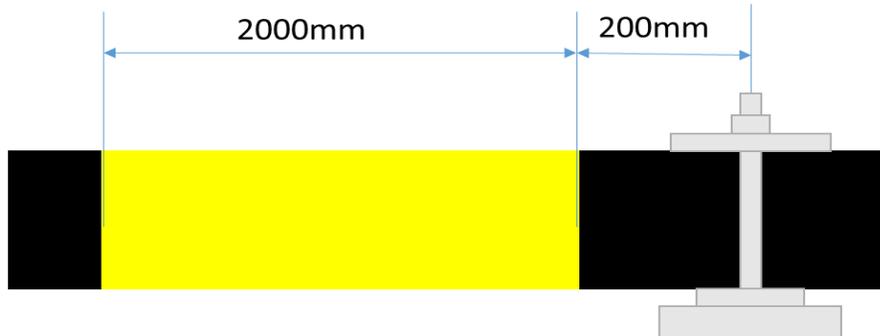


Figura 6.26

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso di dimensioni 2000 mm a 200mm dalla cella.

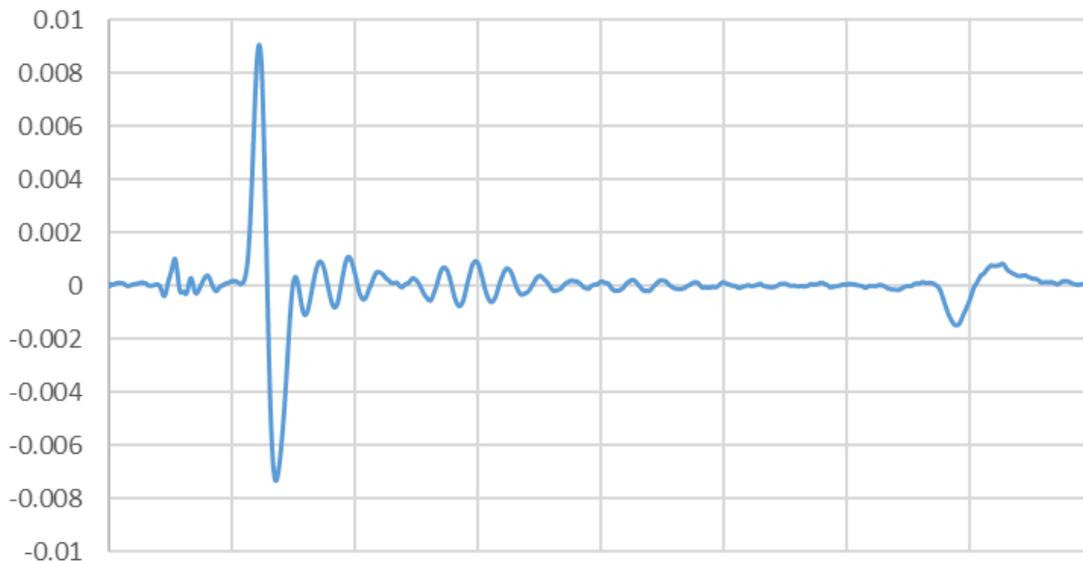


Figura 6.27

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, solo semiconduttivo esterno, elettrodo dell'impulso di 2000mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 80 kV.

In questo caso è evidente la riduzione del disturbo esponenziale; il segnale è elaborabile nonostante una perdita notevole di informazioni. Però è palese come questa prova sia infattibile, dato che richiederebbe uno spazio di azione sul cavo troppo grande.

A questo punto ci si è ricondotti al caso prossimo a quello reale, cioè con la presenza dello schermo sul cavo. In figura 6.3 questo implica la reintroduzione dei parametri relativi allo schermo, cosa sino ad ora non considerata.

In Figura 6.28 si può vedere che la posizione di cella ed elettrodi non cambia rispetto a quella meno disturbata provata sinora; si ha un'apertura degli schermi di 2m.

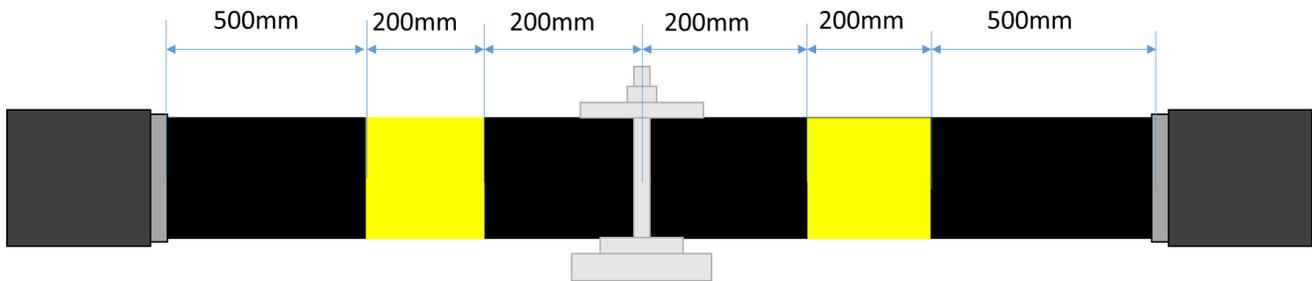


Figura 6.28

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso, il tutto inserito in una finestra di 2m da schermo a schermo.

Il pattern ottenuto da questa prova è riportato in Figura 6.29.

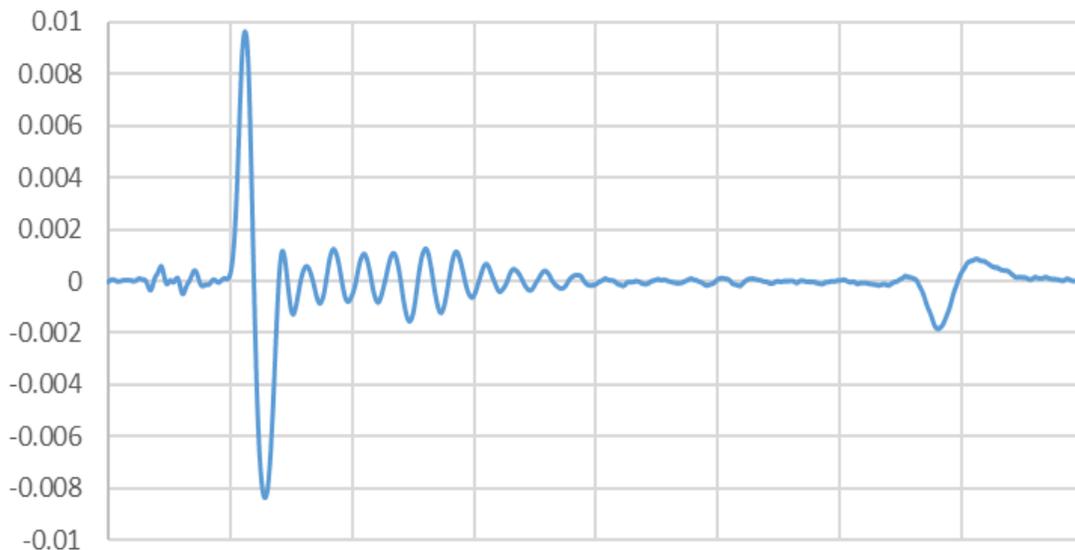


Figura 6.29

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, semiconduttivo esterno rivestito dallo schermo, elettrodo dell'impulso di 2000mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 80 kV.

Si ha un segnale con i soli disturbi oscillanti, il disturbo esponenziale (quello più disturbante per la misura) è praticamente nullo. Il segnale elaborato continuerà a presentare dei disturbi, ma non si avrà la distorsione evidente di campo elettrico come nei casi precedenti.

6. Le misure PEA nei cavi modello

La stessa prova è stata fatta testando la presenza o meno della connessione a terra della terminazione dell'impulso. Lo schema circuitale vuole che l'impulso sia collegato a terra prima e dopo la guida d'onda. Mentre a monte la connessione è vincolata alla terra dello strumento stesso, a valle questa può non essere messa. Come si vede in Figura 6.30 i due risultati hanno una notevole differenza.

È quindi fondamentale assicurare una buona connessione a terra della terminazione dell'impulso.

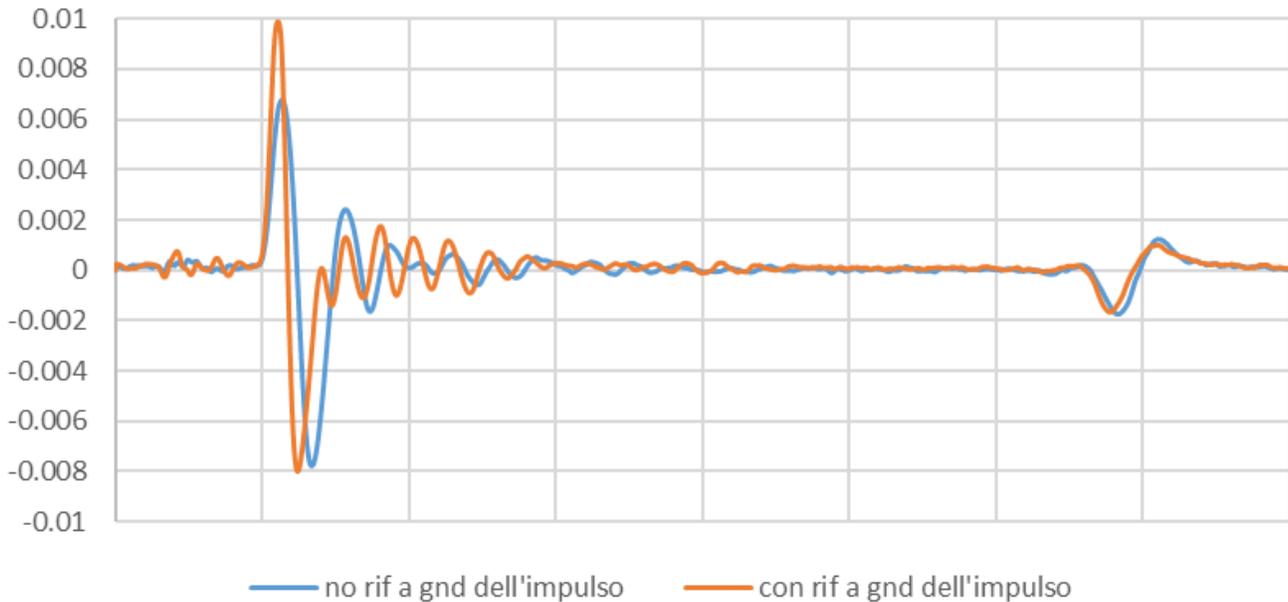


Figura 6.30

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali in olio di lino, semiconduttivo esterno rivestito dallo schermo, elettrodo dell'impulso di 2000mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 80 kV.

Il riferimento a terra della terminazione dell'impulso vincola il potenziale nullo nella generazione dell'impulso. Il contrario porta ad un impulso maggiormente distorto e una perdita di risoluzione della prova, infatti un picco più ampio è sintomo di una maggior perdita di dati.

6.3 Test di misura su cavo modello di 10m e terminali da 300 kV

I cavi modello sono utilizzati per simulare gli stress, in scala, a cui verranno sottoposti i cavi full size. In particolare è interessante poter testare i materiali a campi elettrici elevati, con o senza la presenza di gradienti termici.

Per riuscire ad applicare tensioni elevate sono quindi necessari dei terminali in grado di eliminare la possibilità di scariche superficiali tra il conduttore e la semiconduttiva esterna del cavo. Questi terminali sono appositamente costruiti per i cavi modello e usano l'olio di lino come dielettrico reimpitativo.



Figura 6.31

Setup di misura per la prova PEA con terminali da 300kV in olio di lino.

6. Le misure PEA nei cavi modello

Con questa configurazione sono state fatte diverse prove per capire se anche il tipo di terminazione potesse influire sull'impedenza caratteristica del cavo e quindi sulla riuscita della misura. Inoltre, con queste prove, si cerca di determinare quale sia la condizione migliore per fare misure di cariche di spazio.

La prima prova è stata fatta su un cavo privo di schermo e con l'impulso applicato da un solo lato rispetto la cella, Figura 6.32.

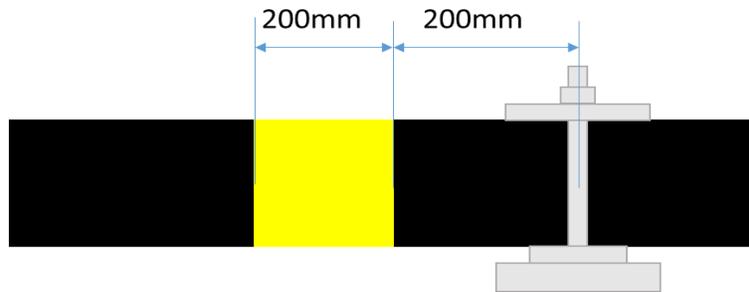


Figura 6.32

Cavo con cella PEA e elettrodi impulso su di un lato rispetto alla cella.

Con tale configurazione la misura ha dato il risultato in Figura 6.33.

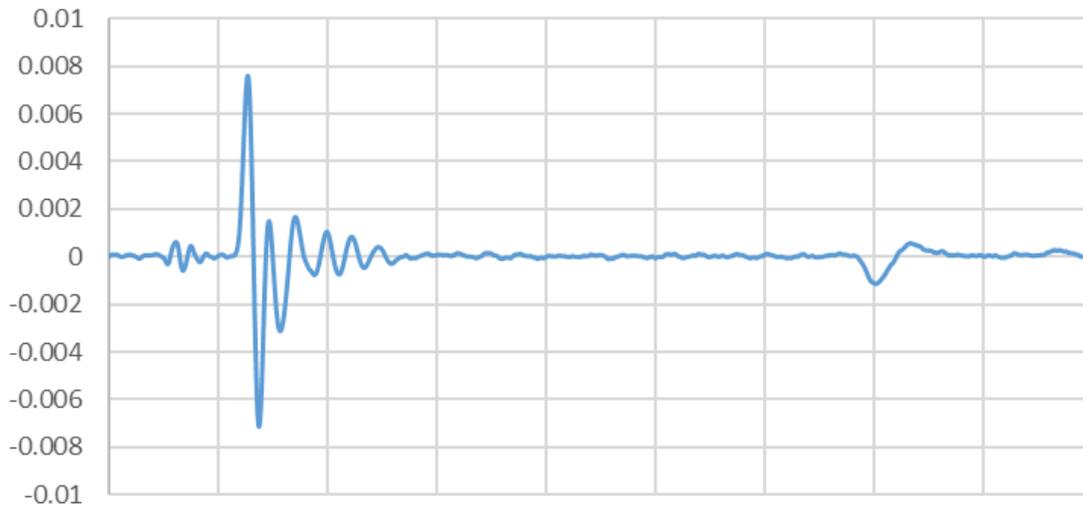
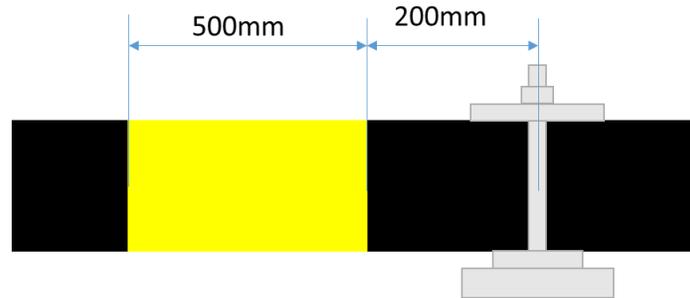


Figura 6.33

mV – N° punti

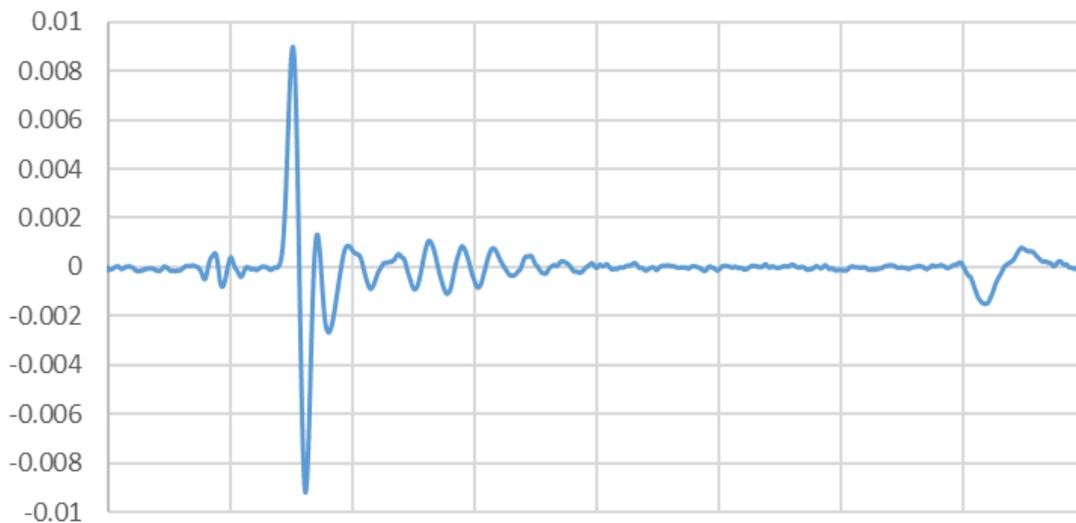
Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo esterno su tutto il cavo, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 120 kV.

In questa condizione il segnale è molto simile all'analogo nel paragrafo precedente. Dalla presente condizione si ottiene la prossima allungando l'elettrodo dell'impulso portandolo ad una lunghezza di 500 mm.

**Figura 6.34**

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su di un lato rispetto alla cella.

Con questa configurazione il risultato della prova ha portato ad una variazione dei disturbi, come si vede in Figura 6.35.

**Figura 6.35**

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo esterno su tutto il cavo, elettrodo dell'impulso di 500mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 120 kV.

In questo caso il disturbo oscillante è ritardato rispetto al picco dell'elettrodo di terra. Riferendosi alla figura 6.3 si vuole variare i valori della Rsemicon2 in modo da ottenere una maggior parte dell'impulso che va ad eccitare il materiale dielettrico piuttosto che richiudersi verso terra attraverso lo strato semiconduttivo esterno.

Con la medesima configurazione appena studiata si trasla l'elettrodo dell'impulso più vicino alla cella; la rappresentazione è in Figura 6.36.

6. Le misure PEA nei cavi modello

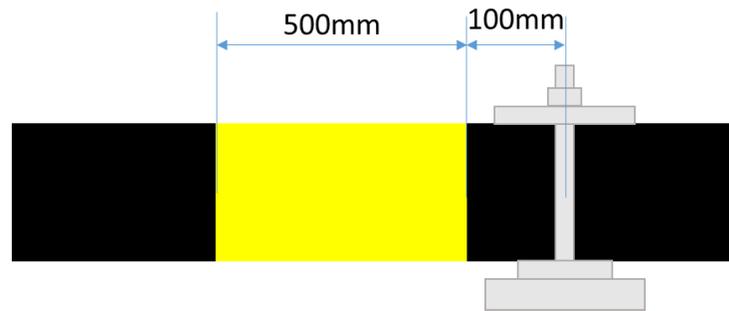


Figura 6.36

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su di un lato rispetto alla cella.

Il pattern ottenuto dalla misura è quindi riportato in Figura 6.37.

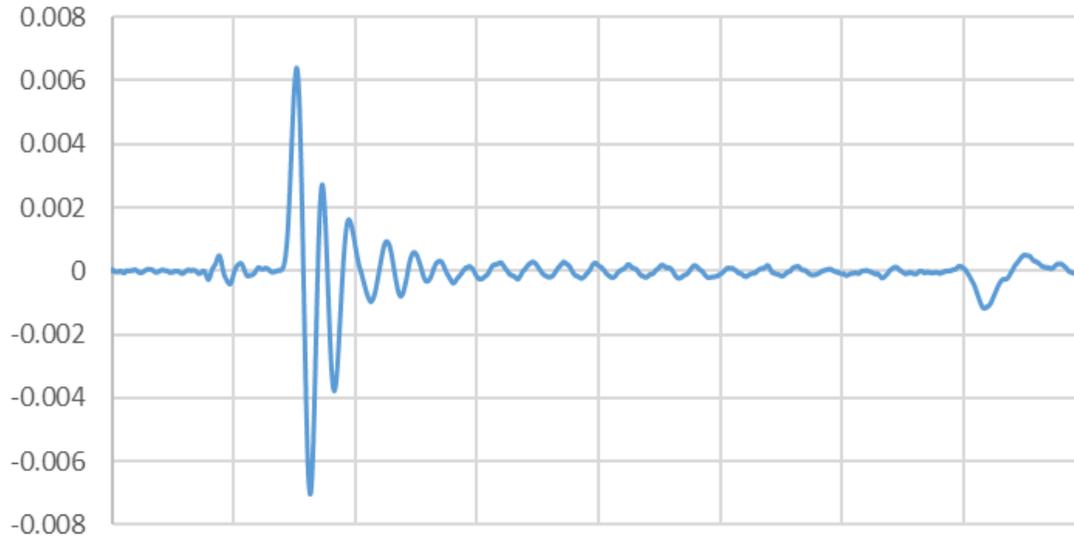


Figura 6.37

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo esterno su tutto il cavo, elettrodo dell'impulso di 500mm a 100mm dalla cella, tensione applicata 120 kV.

Questa condizione porta due effetti negativi nella misura. Infatti si ha un aumento del disturbo oscillante e, allo stesso tempo, una riduzione dell'ampiezza dei picchi degli elettrodi. Questi aspetti concorrono entrambe nell'ottenimento di una forma d'onda peggiore che, se elaborata, contiene delle distorsioni che verranno tramutate in distorsioni di campo elettrico nello strato isolante.

Se l'eccessiva vicinanza dell'elettrodo dell'impulso alla cella introduce dei disturbi, allora si può pensare di muoverlo nella direzione opposta, quindi allontanarsi dalla cella.

In Figura 6.38 si vede la configurazione di prova nella quale le calze sono state avvolte ad una distanza di 500mm.

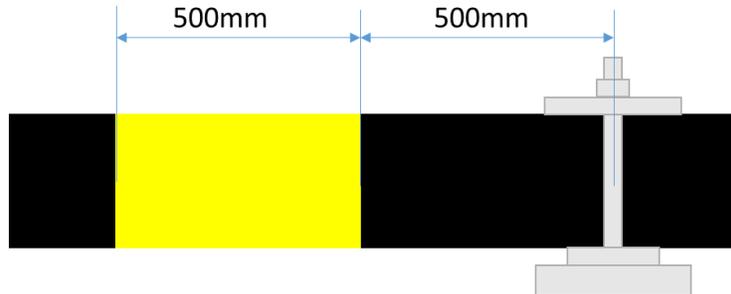


Figura 6.38

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su di un lato rispetto alla cella.

In questo caso la misura effettuata ha dato il pattern in Figura 6.39.

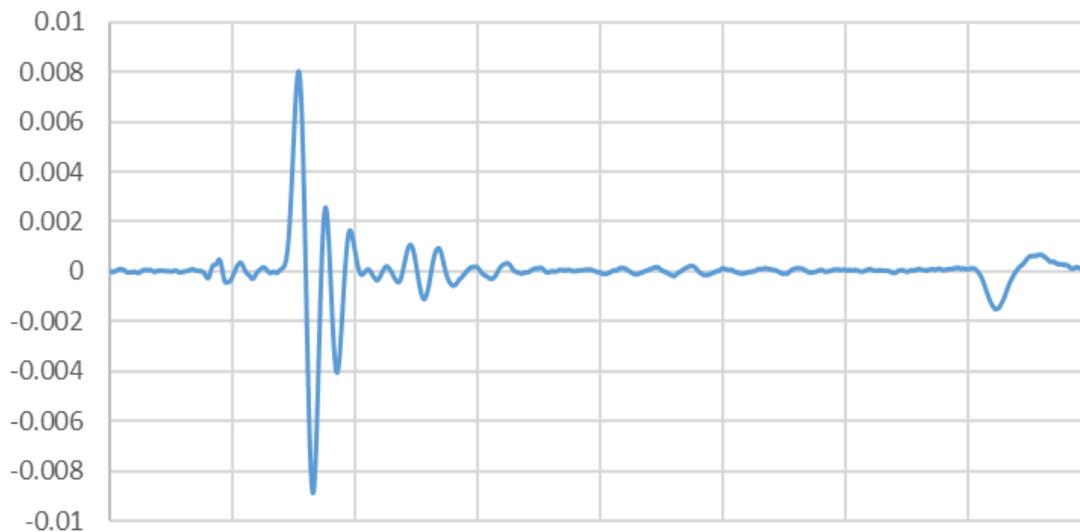


Figura 6.39

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo esterno su tutto il cavo, elettrodo dell'impulso di 500mm a 500mm dalla cella, tensione applicata 120 kV.

Si può notare una variazione dei disturbi, in particolare un ritardo del disturbo oscillante. Nonostante queste variazioni i pattern risultano ancora piuttosto distorti per una valutazione corretta del campo elettrico.

Mettendo a confronto le acquisizioni di Figura 3.5, Figura 3.7 e Figura 3.9 si possono fare delle interessanti osservazioni. Oltre alla variazione del disturbo si ha anche una modifica dell'ampiezza dei picchi relativi agli elettrodi; si può infatti notare che ad una distanza di 200 mm il picco ha un valore di

6. Le misure PEA nei cavi modello

circa 0.9 mV, avvicinando l'elettrodo alla cella si ha una notevole diminuzione della $R_{semicon1}$ e della $R_{semicon2}$, questo fa sì che l'impulso veda un'impedenza molto piccola verso terra e prediliga il percorso sulla superficie esterna del cavo per richiudersi. Proprio per questo motivo il grafico in Figura 3.7 è caratterizzato dal picco dell'elettrodo di terra che ha un valore di circa 0.06 mV; si ha quindi una notevole attenuazione dell'effetto dell'impulso sul campione in prova. Allo stesso modo anche l'allontanamento dell'impulso dalla cella causa una riduzione dell'effetto sulle cariche; in questo caso l'impulso ha un percorso maggiore per richiudersi attraverso la terra della cella, quindi attraverso la capacità del dielettrico in prova, e viene attenuato.

Utilizzando la configurazione con due elettrodi per l'impulso, uno su ogni lato della cella, si ottiene la misura riportata in Figura 6.41.

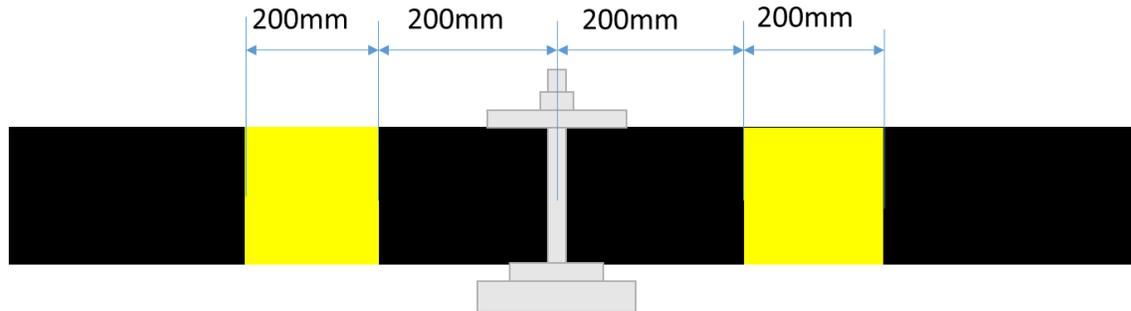


Figura 6.40

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su entrambe i lati rispetto alla cella

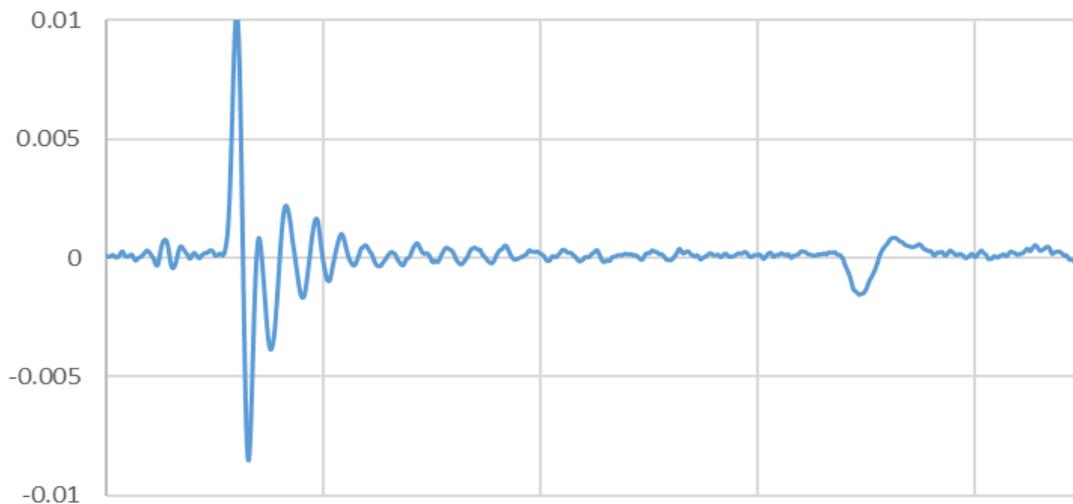


Figura 6.41

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo esterno su tutto il cavo, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 120 kV

La misura ottenuta è molto simile a quella del caso riportato nel grafico di Figura 6.33. Le oscillazioni sono molto simili, inoltre si è aggiunto il disturbo esponenziale.

Le due prove che seguono sono state fatte su un setup di prova analogo al precedente, ma con la presenza dello schermo che ricopre lo strato di semiconduttivo esterno.

In Figura 6.42 si ha la configurazione della prima prova, in Figura 6.43 quella della relativa misura.

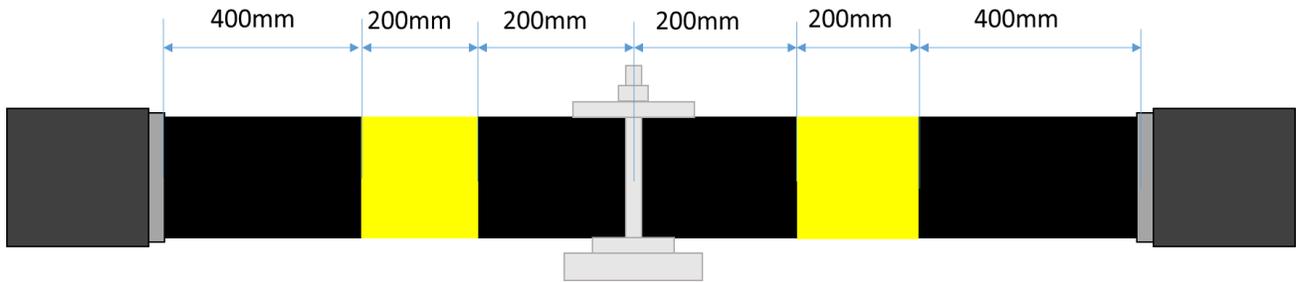


Figura 42

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su entrambe i lati rispetto alla cella e schermo

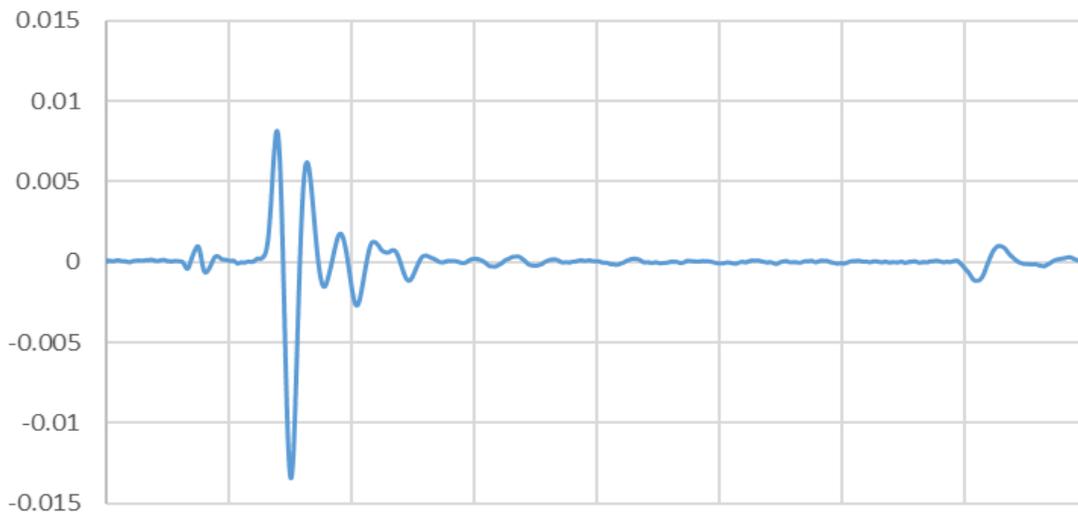


Figura 6.43

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1600mm, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 120kV

La seguente prova differisce dalla presente solo per la distanza dello schermo del cavo dagli elettrodi dell'impulso.

6. Le misure PEA nei cavi modello

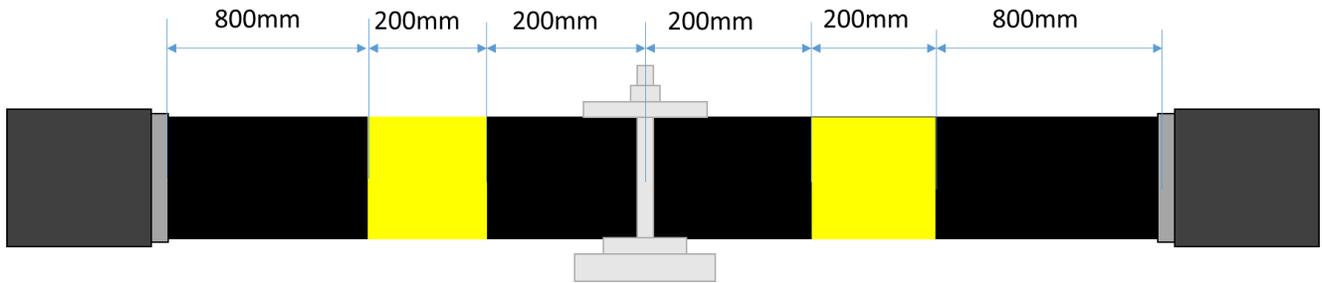


Figura 6.44

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su entrambe i lati rispetto alla cella e schermo

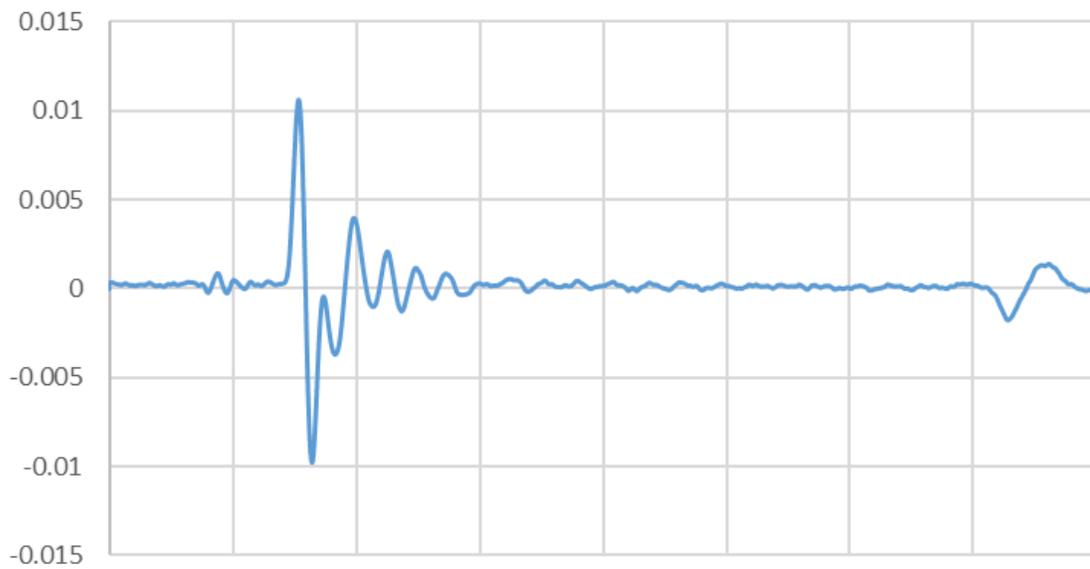


Figura 6.45

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 2400mm, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 120kV

Le due misure portano alla luce la condizione migliore con la quale effettuare delle prove PEA, cioè con la maggiore porzione rimossa dello schermo del cavo possibile. Nonostante ciò, nel caso in Figura 6.45 si ha la presenza del disturbo esponenziale che altera il segnale nella zona del dielettrico.

6.4 Test di verifica dell'impedenza del collegamento verso terra

Il paragrafo 6.3 è quello svolto con setup di prova che più si avvicinano alla realtà dei test che vengono svolti nei laboratori. In particolare, le misure che più si avvicinano a quelle reali sono le ultime due, è quindi sensato pensare di andare ad agire su queste configurazioni in maniera da ottenere il miglior risultato possibile.

Nelle ultime due misure si è notato un miglioramento nel caso di allontanamento degli schermi dagli elettrodi dell'impulso, questo ha un effetto sui parametri $R_{semicon3}$ e $R_{semicon4}$; il circuito considerato è quello in Figura 6.3 che è stato qui di seguito riportato per comodità.

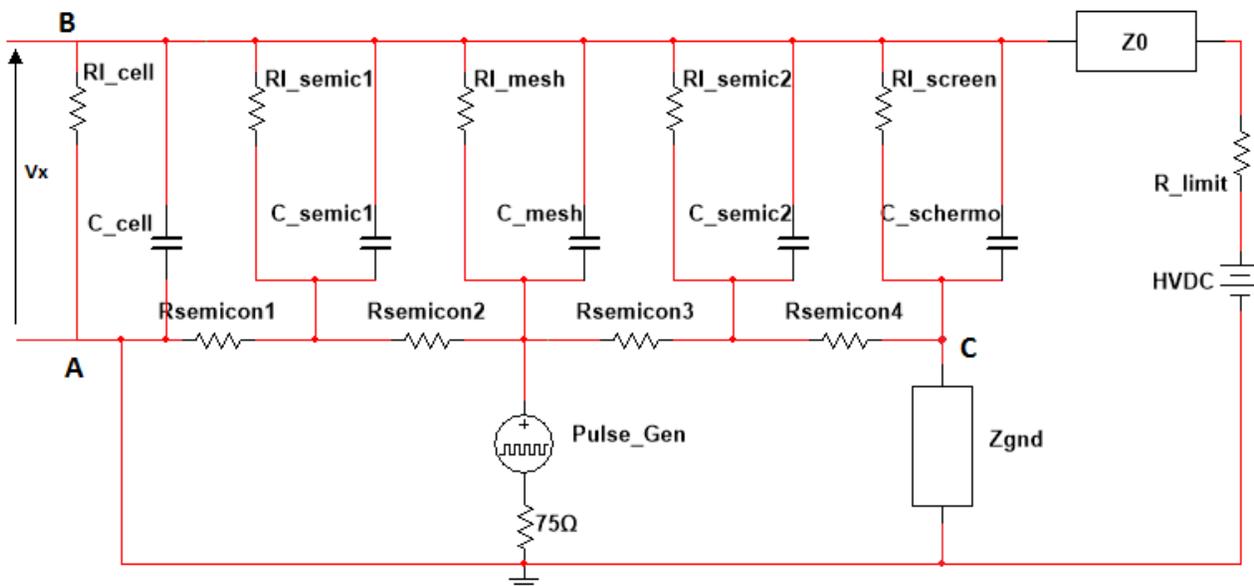


Figura 6.46

Schema circuitale equivalente a parametri concentrati del percorso visto dall'impulso

Aumentare i parametri $R_{semicon3}$ e $R_{semicon4}$ significa aumentare l'impedenza nel ramo a destra rispetto all'iniezione dell'impulso; avendo un'impedenza maggiore sul lato destro l'impulso tenderà ad andare lungo l'impedenza capacitiva o sulle resistenze del ramo sinistro. Per accentuare maggiormente questo fenomeno si è pensato di eliminare il collegamento franco a terra degli schermi e rimpiazzarlo con un'impedenza; per la precisione il collegamento, indicato con Z_{gnd} in Figura 6.46, è stato fatto con delle resistenze in ceramica.

Il collegamento a terra dello schermo serve per garantire l'impossibilità ad esso di comportarsi come un potenziale flottante e portarsi ad un potenziale diverso da zero, questo vorrebbe dire sia una

6. Le misure PEA nei cavi modello

variazione del campo elettrico sul cavo che un pericolo per le cose vicine al cavo. La presenza di resistenze vorrebbe dire dare la possibilità allo schermo di portarsi ad un potenziale diverso da quello nullo e stabilito dalla caduta sulle resistenze. Per verificare che questo setup non portasse né ad una condizione gravosa per il cavo, né ad una condizione pericolosa per l'uomo, è stata fatta una prova monitorando costantemente la tensione dello schermo rispetto terra al variare della tensione applicata al cavo. Si è ottenuto che alla tensione di 280kV applicata al cavo corrisponde una tensione di 50mV; nonostante la Z_{gnd} ha quindi senso considerare lo schermo vincolato al potenziale nullo.

Le prove sono state svolte aumentando gradualmente il valore della resistenza del collegamento a terra; si è partiti da una resistenza di 240 Ω per passare ad una di 360 Ω ed infine una da 480 Ω .

La configurazione utilizzata è quella in Figura 6.48.

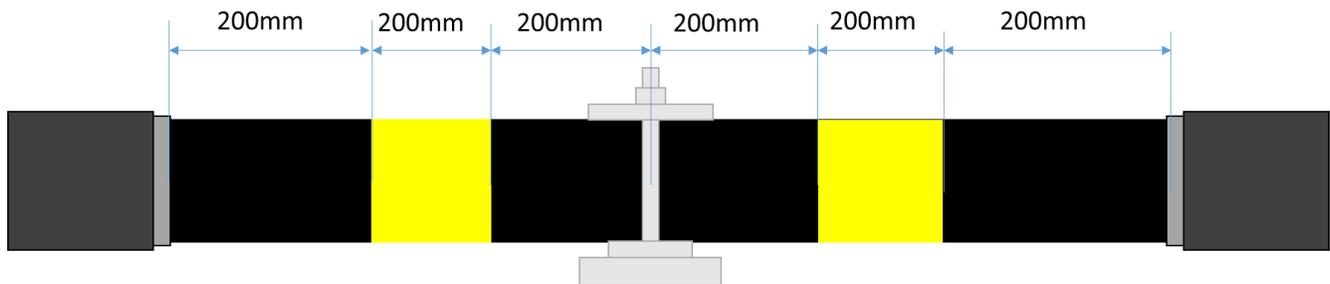


Figura 6.47

Cavo con cella PEA e elettrodo impulso su entrambe i lati rispetto alla cella e schermo

Di seguito verranno riportati i grafici di ogni acquisizione partendo dal collegamento franco per poi aumentare il valore della Z_{gnd} .

a) Collegamento franco

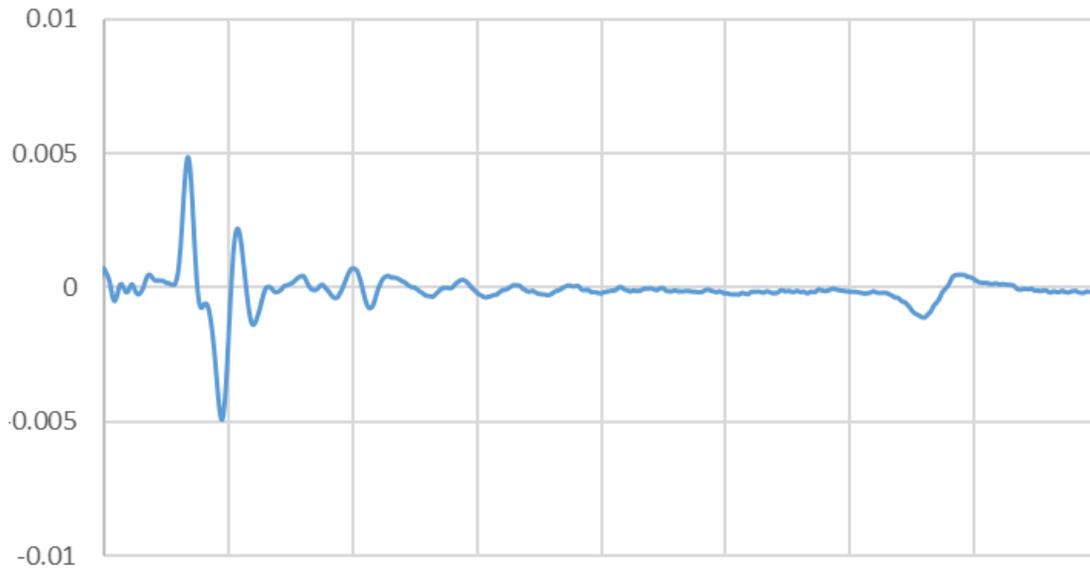


Figura 6.48
mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegamento a terra franco, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

b) R=240 Ω

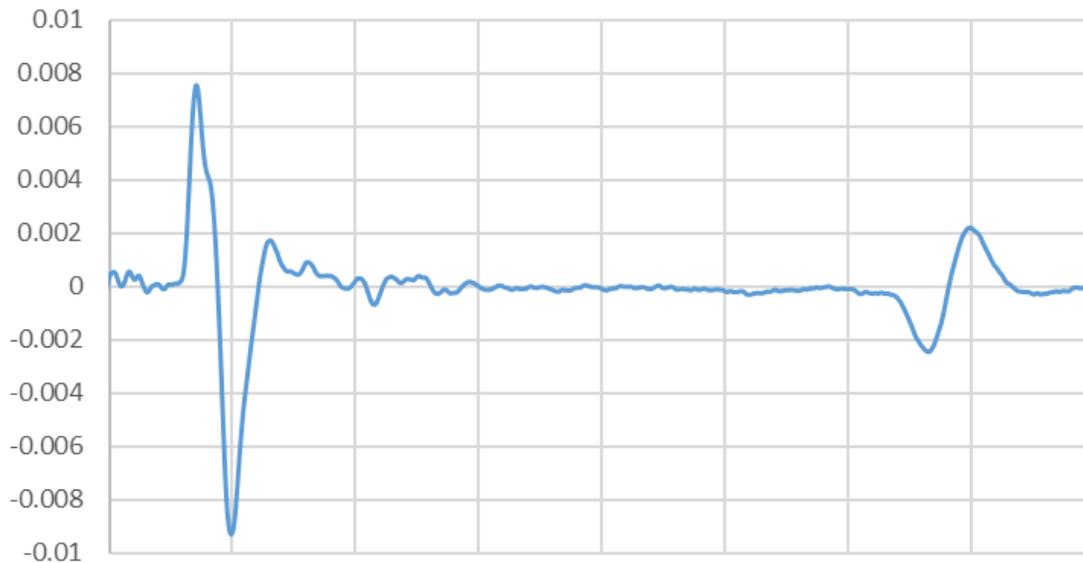


Figura 6.49
mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegato a terra tramite impedenza da 240 Ω, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

6. Le misure PEA nei cavi modello

c) $R=360 \Omega$

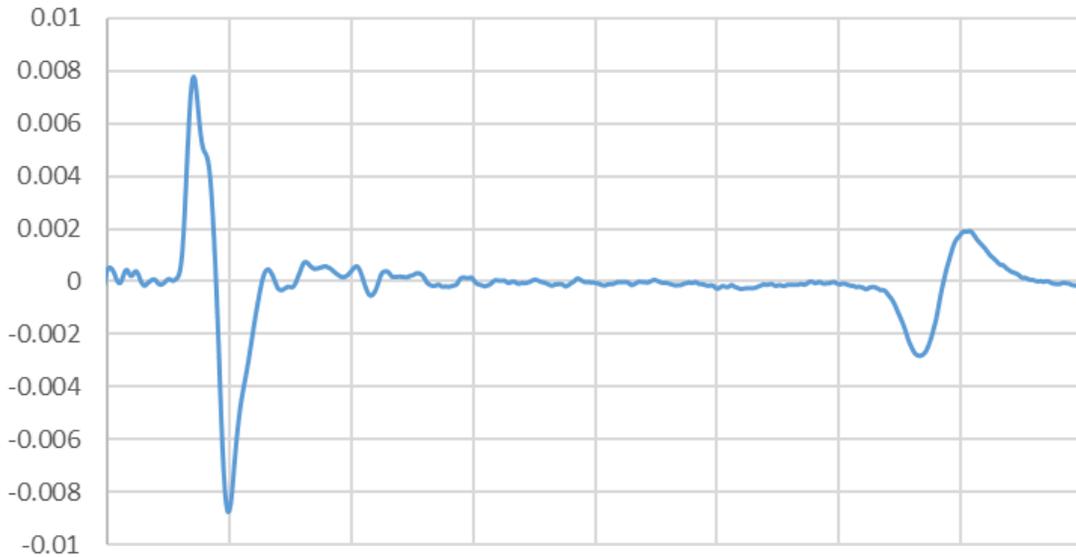


Figura 6.50

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegato a terra tramite impedenza da 360 Ω , elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

d) $R=480$

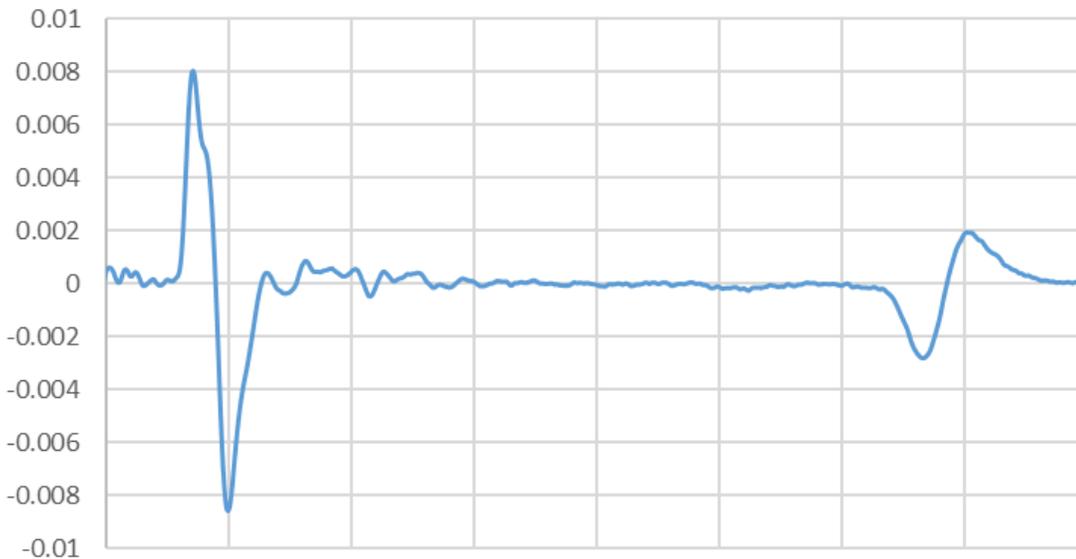


Figura 6.51

mV – N° punti

Pattern della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegato a terra tramite impedenza da 360 Ω , elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

Nel caso di collegamento franco, in Figura 6.48, si ha un notevole disturbo, questo va a sovrapporsi al picco generato dall'elettrodo esterno distorcendo così anche la stessa distribuzione di carica dell'elettrodo. Aumentando la resistenza si ha una diminuzione di questo disturbo, oltre ai 360 Ω non si hanno però ulteriori miglioramenti.

Il risultato ottenuto con la configurazione di Figura 6.47 e con una Z_{gnd} del valore di 360 Ω è tutto sommato un segnale utilizzabile. Infatti la presenza dei disturbi viene filtrata in fase di calibrazione dalla deconvoluzione e il risultato, non essendo un segnale perfettamente piatto nei valori centrali, quelli corrispondenti al dielettrico, sarà dato con una perdita di informazioni relative alla zona dell'isolante vicino all'elettrodo di terra.

Per avere un miglior confronto fra i segnali ottenuti e verificare che la presenza dell'impedenza migliori la misura, si mostrano le quattro misure sullo stesso grafico in Figura 6.52.

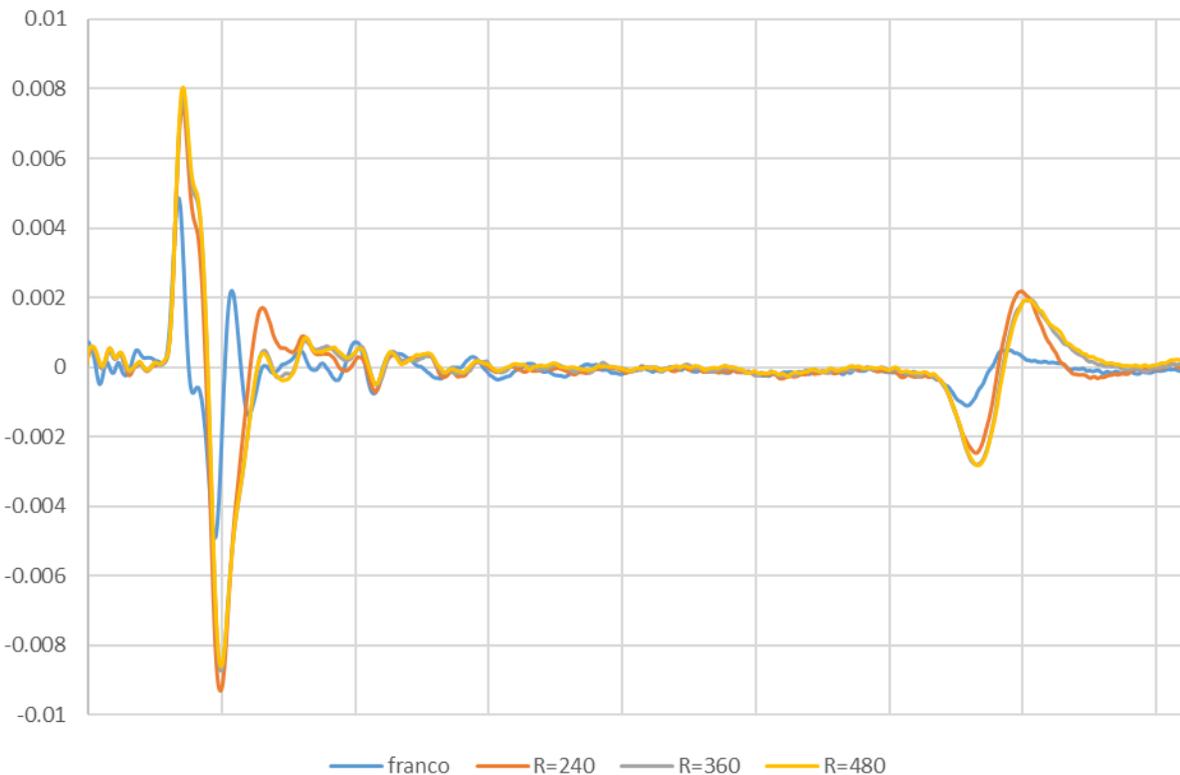


Figura 6.52

mV – N° punti

Pattern sovrapposti della misura PEA su un cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegato a terra tramite impedenza da Z_{gnd} variabile, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

Sovrapponendo i grafici si nota ancora meglio l'entità dei disturbi nella prova con collegamento franco (blu), disturbi che vengono poi attenuati all'aumentare dell'impedenza di terra. Inoltre si nota che nel passaggio dalla resistenza di 360Ω a quella di 480Ω il segnale non subisce variazioni.

Si è quindi appurato che il miglior setup con il quale performare le misure per i cavi modello sia quello con il doppio elettrodo di 200 mm su entrambe i lati della cella, a una distanza di 200 mm dalla cella stessa, a 200 mm dallo schermo del cavo e con lo schermo collegato a terra tramite un'impedenza del valore di 360Ω .

Utilizzando questo setup sono state poi svolte delle misure PEA trattate nel seguito di questo capitolo.

6.5 Test di verifica della risposta del sistema PEA al variare della durata dell'impulso di eccitazione

Come già menzionato nel Capitolo 4 e nel Capitolo 5 il generatore d'impulso utilizzato per eccitare le cariche di spazio può avere diverse caratteristiche. I generatori forniti hanno un potenziometro con il quale variare l'ampiezza dell'impulso generato, l'altro parametro che caratterizza l'impulso e la cui modifica influisce sulla sensibilità della misura è la durata di esso.

Nel Capitolo 4 si è parlato di come la durata dell'impulso sia direttamente proporzionale alla sensibilità della misura, ma inversamente proporzionale alla risoluzione.

La risoluzione, lungo la direzione dello spessore dell'isolante, della misura in funzione della durata dell'impulso è data dall'equazione (6.1) [6].

$$\eta = \frac{\Delta T_P}{d/v_{sa}} 100\% \quad (6.1)$$

Nelle prove su cavi modello lo spessore dell'isolante, di 5 mm, consente l'utilizzo di un generatore d'impulso di 40 ns; uno spessore così contenuto non comporta un'elevata attenuazione dell'onda di pressione, quindi si opta per una maggior risoluzione a discapito della sensibilità utilizzando un impulso dalla durata ridotta. Viceversa, nei cavi full size, lo spessore anche oltre i 20 mm comporta un'attenuazione importante del segnale, questo implica la necessità di un segnale con una buona sensibilità generato da un impulso della durata di 110 ns; secondo la formula (6.1) si perde quindi in risoluzione.

Di seguito verranno riportate le acquisizioni fatte con entrambe i generatori e in entrambe le polarità. Per rendere più facile il confronto verranno mostrate nello stesso grafico le acquisizioni fatte con la medesima polarità della tensione applicata al cavo, ma con i due diversi tipi di impulso.

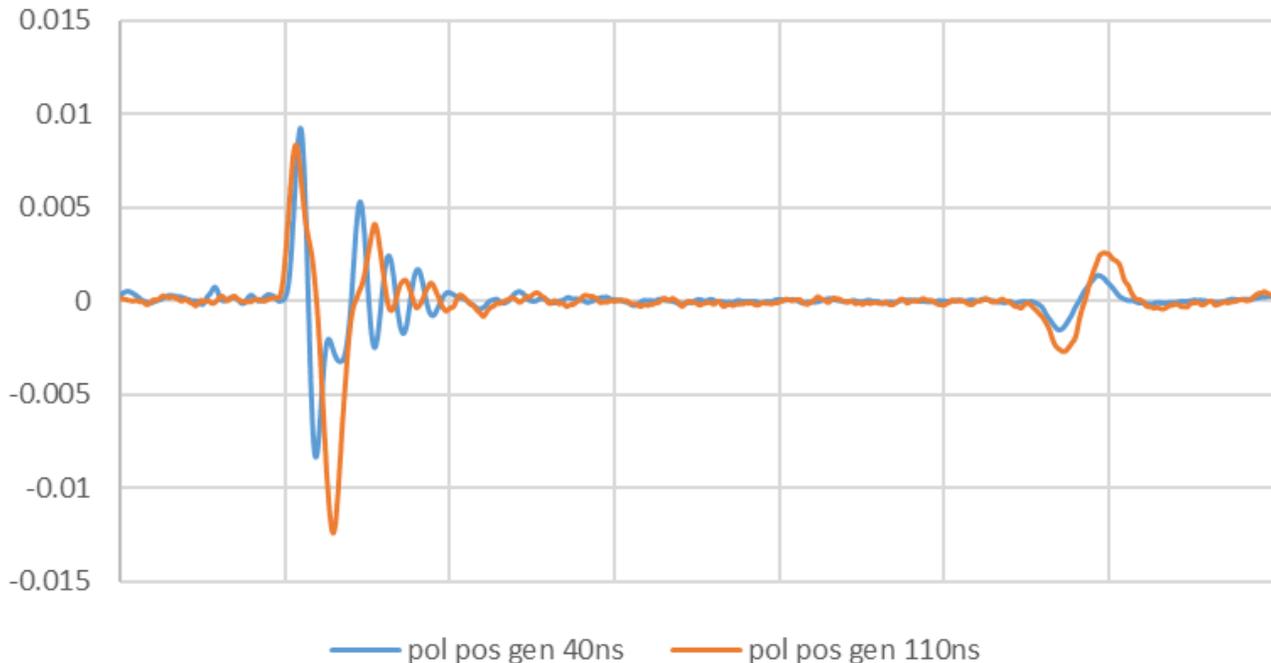


Figura 6.53

mV – N° punti

Pattern sovrapposti della misura PEA con impulsi di diversa durata. Cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegato a terra tramite impedenza Zgnd, elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

Si nota perfettamente come l'impulso da 40 ns generi dei picchi di ampiezza temporale minore rispetto a quello da 110 ns. Pur non utilizzando la formula si capisce che impulsi più stretti permettono una miglior scansione dello strato isolante.

Tuttavia nel segnale azzurro si ha un'evidente perturbazione introdotta dai disturbi oscillanti; il disturbo è tanto evidente che si ha una deformazione della sovraelongazione del picco dell'elettrodo che viene valutata, in fase di elaborazione, come una distorsione del segnale dovuta alla presenza di cariche.

Nel caso del generatore d'impulso da 110 ns si ha che il segnale del picco è più ampio e parte del disturbo viene quindi inglobata dal segnale; questo metodo è lo stesso utilizzato nel paragrafo 5.2 per eliminare la riflessione dell'impulso fra il suo elettrodo e l'interruttore interno allo strumento.

6. Le misure PEA nei cavi modello

L'effetto sulla sensibilità lo si nota nel picco relativo al conduttore, infatti l'impulso da 110 ns fa sì che l'oscillazione sia maggiore e quindi meglio apprezzabile.

Le stesse misure sono state fatte anche in polarità inversa, quindi applicando al cavo una tensione di -100 kV. Come si nota in Figura 6.54 i picchi hanno polarità opposta rispetto a quelli della Figura 6.53.

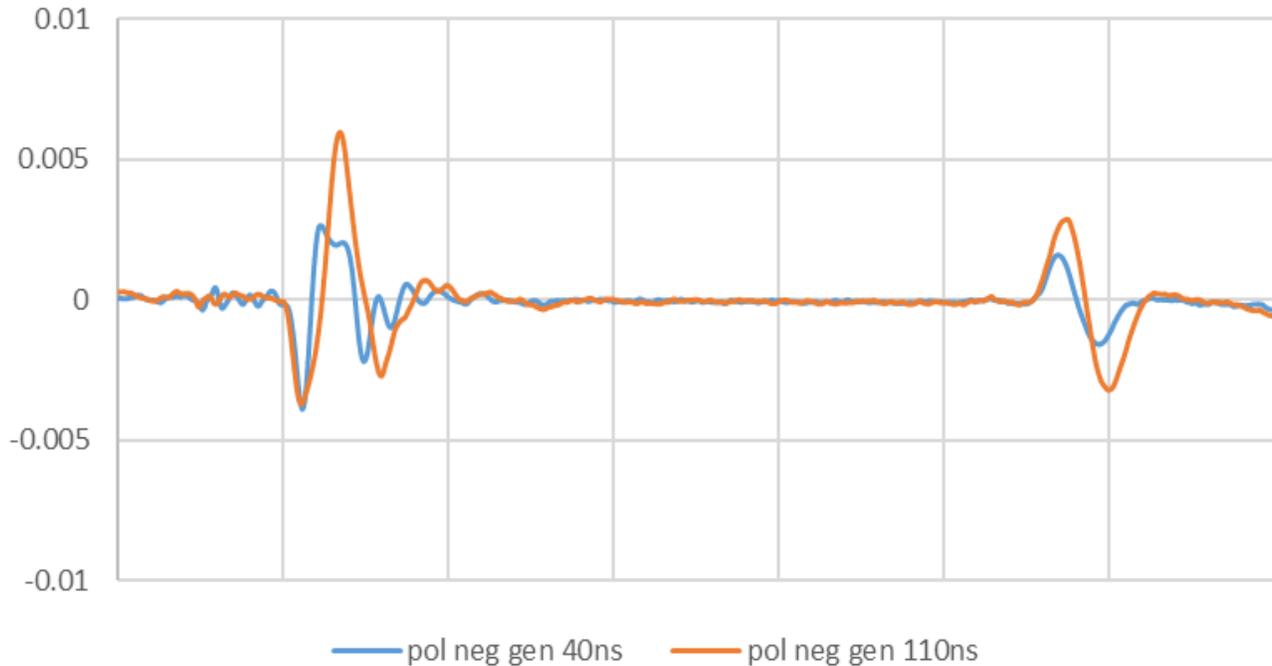


Figura 6.54

mV – N° punti

Pattern sovrapposti della misura PEA con impulsi di diversa durata. Cavo di lunghezza 10 m, con terminali da 300kV in olio di lino, semiconduttivo e schermo con apertura 1200mm collegato a terra tramite impedenza Z_{gnd} , elettrodo dell'impulso di 200mm a 200mm dalla cella, tensione applicata 100kV

Nelle prove con polarità negativa il disturbo è estremamente evidente, tanto da deformare il picco dovuto alla sovraelongazione facendolo diventare una pseudo onda quadra. Come prima, questa distorsione è incompatibile coi fini della misura.

Utilizzando il generatore da 110 ns si ottiene un segnale pur sempre disturbato, ma senza deformazioni tali da generare distorsioni di campo assude.

Il confronto fra questi due generatori conferma il fatto che le distorsioni del campo siano date da disturbi che si sovrappongono al segnale, non dalla effettiva presenza di carica spaziale nel dielettrico.

La prova è data dal fatto che variando generatore d'impulso si ottengono risultati diversi, mentre se vi fosse stata un effettivo accumulo di carica si sarebbe avuta la medesima deformazione.

6.6 Test su cavi per verificare la possibilità di osservare la distribuzione di carica

Dopo i vari test fatti si è giunti alla conclusione che, per ottenere una misura che dia indicazioni sensate, la miglior configurazione è quella con un cavo modello il cui schermo è stato rimosso per una lunghezza di 1200 mm e con collegamento a terra tramite *Zgnd*; inoltre è preferibile utilizzare il generatore d'impulso da 110 ns in modo che i disturbi vengano assimilati dai picchi.

Il setup della misura svolta in questo paragrafo è quello che si vede nella Figura 6.31.

Il test è stato fatto ad una tensione di 200 kV, prima in polarità positiva e poi negativa, quindi un campo elettrico applicato all'isolante di 40kV/mm. Si è deciso di procedere con un campo elettrico molto più alto rispetto ai campi a cui si trovano normalmente ad operare gli isolanti dei cavi, questo per garantire la formazione di carica spaziale e ottenere quindi un pattern con l'informazione che è richiesta da questo tipo di misure. L'acquisizione dei dati di queste prove non è di particolare interesse, ci si concentrerà quindi sull'elaborazione e sui risultati veri e propri.

6.6.1 Polarità positiva

Una volta ottenute tutte le acquisizioni si è proceduto con l'elaborazione del segnale. La calibrazione è stata fatta sul segnale corrispondente all'acquisizione 8 e si è ottenuto il risultato di Figura 6.55. Nella figura si hanno 3 grafici ognuno dei quali ha un significato diverso come già spiegato nel paragrafo 5.7.1.

Il cerchio verde mostra il segnale così come è stato acquisito, come si vede il segnale ha delle distorsioni nella zona del dielettrico adiacente all'elettrodo di terra; le distorsioni tuttavia permettono di ottenere un segnale coerente con la misura, che è evidenziato in Figura 6.55 dal cerchio blu.

Il segnale deconvoluto ha i due picchi relativi agli elettrodi piuttosto evidenti, mentre la parte tra i due, quella che corrisponde all'isolante, è piatta; il segnale è il perfetto esempio del fatto che all'inizio della prova, in un campione vergine, non vi sono cariche intrappolate.

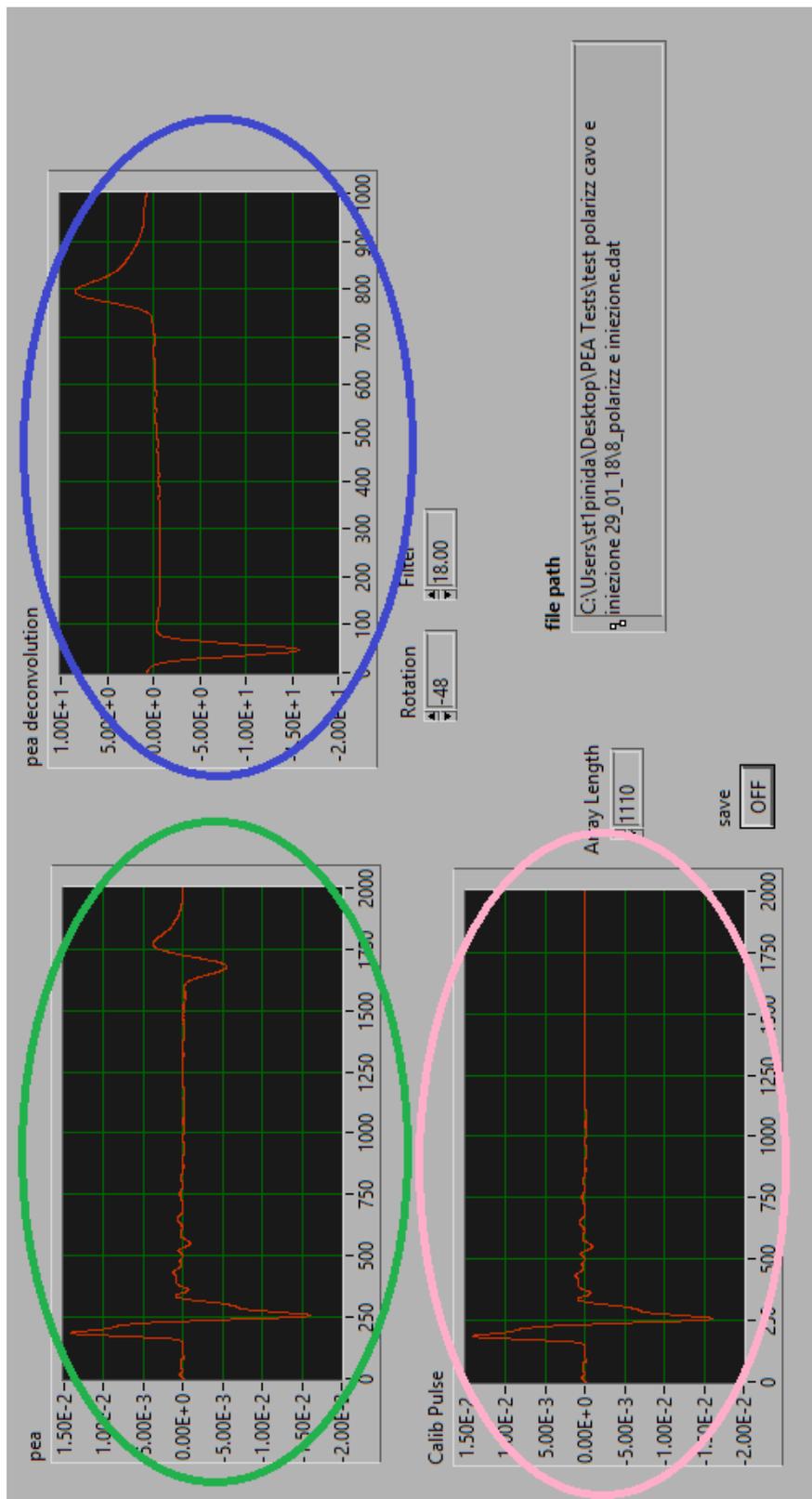


Figura 6.55

Interfaccia del programma di calibrazione con graficata la calibrazione del segnale relativo all'acquisizione 8

Una volta ottenuto il segnale deconvoluto lo si va ad inserire nell'apposita sezione, come spiegato nel paragrafo 5.7. In questo modo si fa la calibrazione fra i due segnali e il sistema prende il segnale 8 come riferimento, tutte le deformazioni nei segnali successivi verranno viste come l'effetto di una distribuzione di carica. Nei grafici di Figura 6.56 si ha la condizione della distribuzione di carica e di campo elettrico nell'isolante all'istante considerato come istante 0. Per vedere l'evoluzione temporale della carica nel materiale è utile valutare il pattern in tre dimensioni (spessore, tempo, intensità di carica) di Figura 6.57.

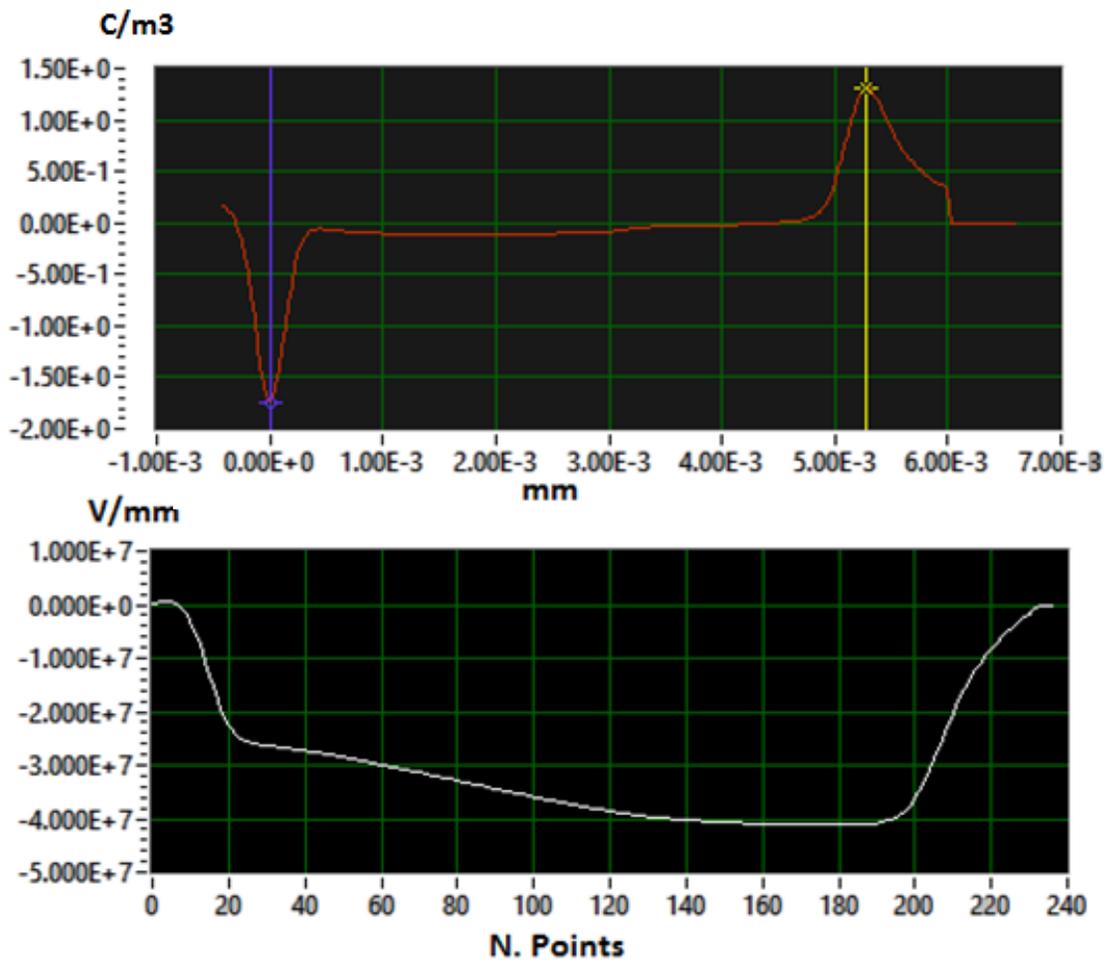


Figura 6.56

1. Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore.
2. Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo.

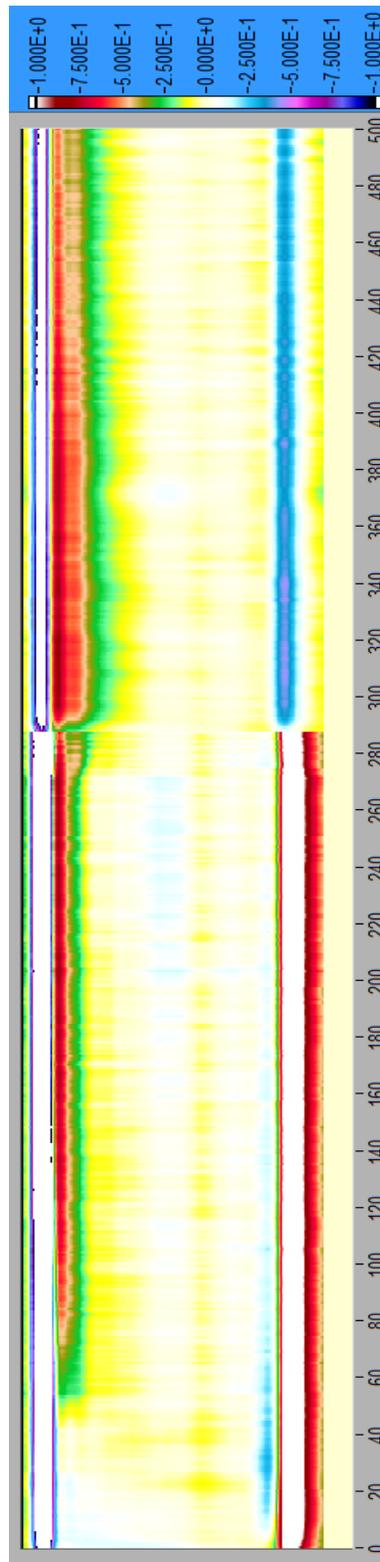


Figura 6.57

Pattern dell'andamento nel tempo della carica lungo lo spessore del cavo. In ascissa si ha il numero di acquisizione, cioè l'evoluzione temporale della prova, l'ordinata corrisponde allo spessore dell'isolante. La legenda dei colori indica la corrispondenza fra il colore e il valore C/m^3

Il grafico 6.57 è interessante in quanto si può avere una visione complessiva dell'andamento della carica; una volta individuati i periodi corrispondenti a fenomeni di carica si può andare ad analizzare nel dettaglio quei pattern. Ad esempio, in figura si nota che nei primi 40 pattern si ha un accumulo di carica solo nell'elettrodo interno, mentre dal quarantesimo in poi si ha un accumulo di carica nell'elettrodo esterno mentre quella dell'elettrodo interno scompare. Si va quindi a valutare con maggior precisione due acquisizioni che presentano tali fenomeni. Di seguito il pattern in Figura 6.58 presenta un accumulo di carica nell'elettrodo interno, questo lo si vede anche nel grafico del campo elettrico dove è apprezzabile una notevole distorsione. Nel Capitolo 7 verrà discusso il calcolo del campo elettrico.

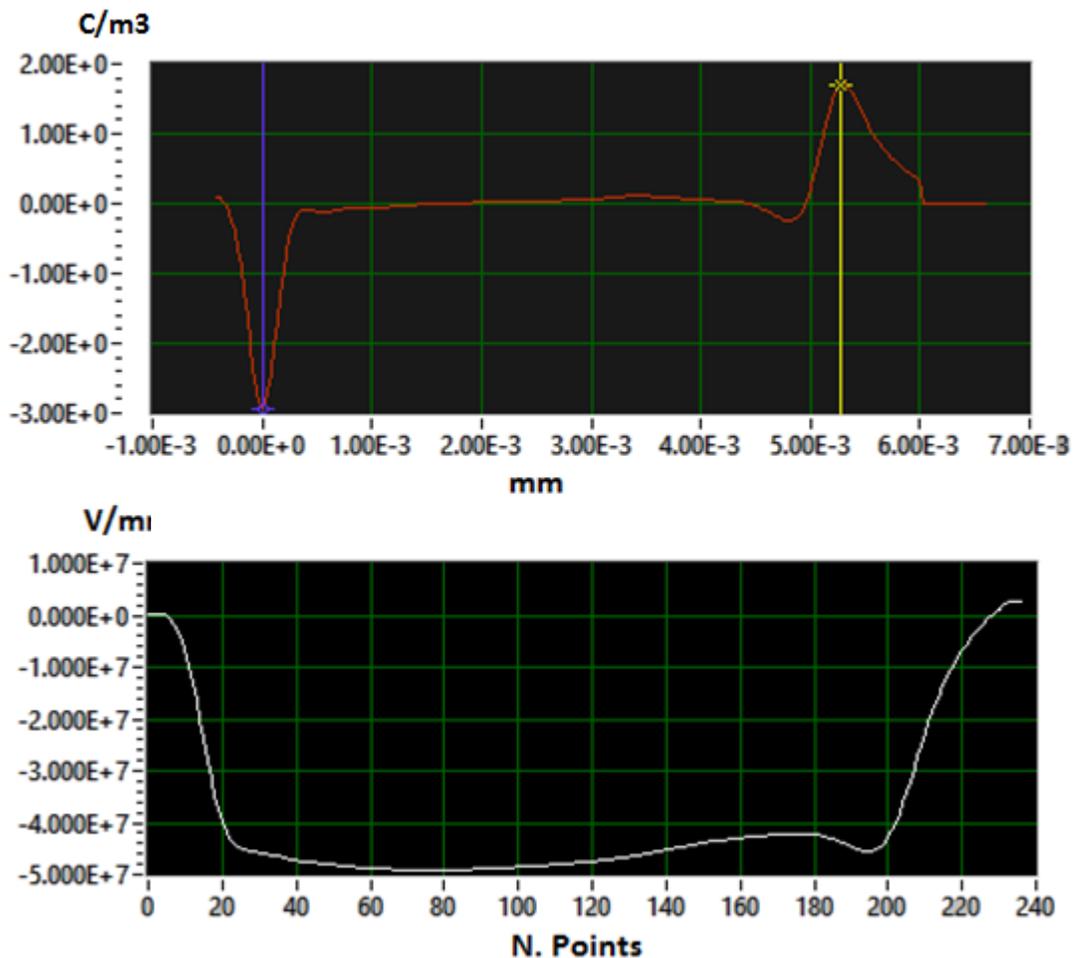


Figura 6.58

Pattern numero 30

1. *Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore.*
2. *Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo*

6. Le misure PEA nei cavi modello

Ancora una volta si nota una variazione del pattern relativo alla quantità di carica nel dielettrico, in particolare si ha un accumulo nella zona adiacente all'elettrodo di terra; conseguentemente si ha anche una distorsione del campo elettrico dovuta alla presenza di questa carica (6.59).

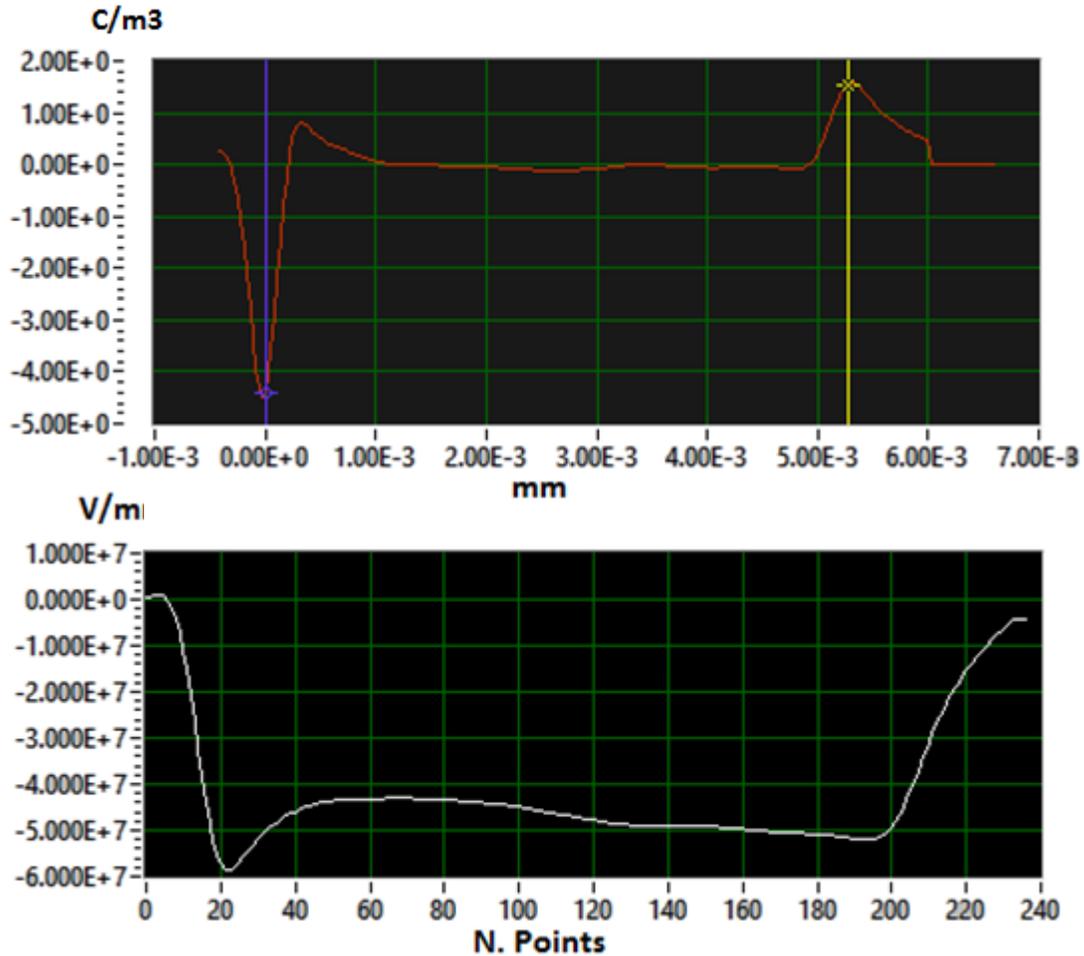


Figura 6.59

Pattern numero 230

1. *Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore.*
2. *Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo*

Osservando il grafico di Figura 6.57 si nota, oltre ai due fenomeni sopracitati, che tra l'acquisizione 280 e l'acquisizione 300 è stata fatta la volt-off del materiale; in questo caso vi è una netta linea distintiva dato che, da quel momento in poi, agli elettrodi non è più applicata tensione e il colore degli elettrodi nel pattern cambia non avendo più la medesima quantità di carica.

Da questa condizione in poi si nota sull'elettrodo di terra, cioè quello dove si ha avuto l'accumulo di carica, una quantità di carica nell'isolante residua che tende a migrare, dimostrazione del fatto che il colore del grafico tende a schiarirsi.

Nella prima acquisizione subito dopo il volt-off (Figura 6.60) si ha il dato più significativo della misura, cioè il valore di carica intrappolata nell'isolante. In questo istante le cariche degli elettrodi possono essere considerate praticamente nulle e le uniche cariche in gioco sono quelle rimaste intrappolate nell'isolante.

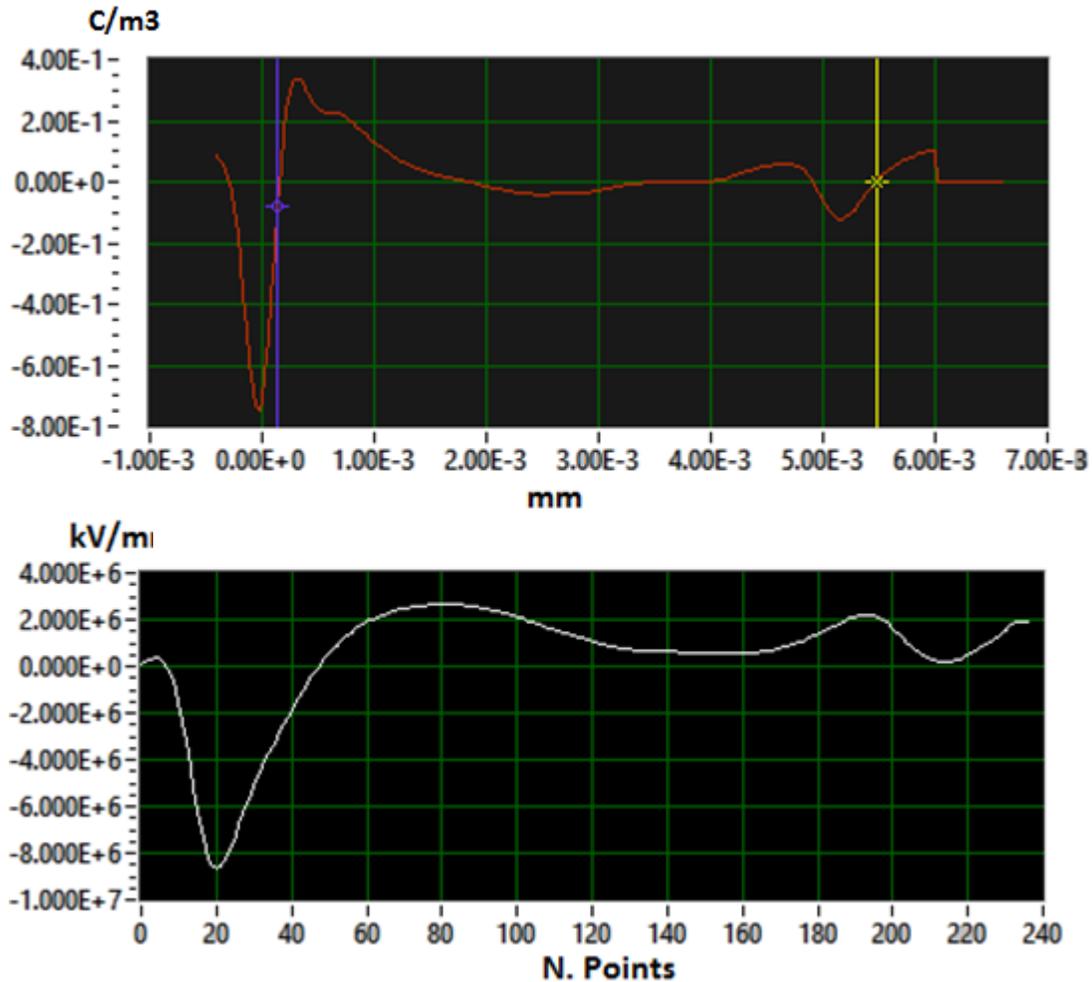


Figura 6.60

Pattern numero 296, primo pattern dopo la volt-off.

1. *Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore.*
2. *Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo*

Le cariche intrappolate nel dielettrico richiamano delle cariche immagine negli elettrodi, quindi si hanno due picchi per ogni elettrodo, del valore della carica e uno di segno opposto. I picchi più interni

6. Le misure PEA nei cavi modello

corrispondono a quelli relativi alle cariche nel dielettrico; posizionando i cursori nel punto dove le due oscillazioni incrociano lo zero si vanno a isolare i soli dati relativi alla distribuzione di carica all'interno degli indicatori blu e giallo. Il programma fa una somma in valore assoluto di questi elementi restituendo il valore totale della carica all'interno della sezione di isolante valutata.

Charge [C/m3]

6.513E-2

Figura 6.61

Indicatore della quantità di carica calcolata fra i due estremi (limitatore blu e limitatore giallo)

6.6.2 Polarità negativa

Questa prova è stata svolta nella stessa identica maniera di quella nel paragrafo precedente, l'unica differenza è data dalla polarità della tensione applicata al sistema. Ovviamente i tempi non possono risultare identici, come non è uguale il tempo di carica del cavo. Per questo motivo il pattern scelto per fare la calibrazione sarà diverso rispetto al caso precedente, in particolare si è scelto il pattern 20.

Nella Figura 6.62 si hanno nuovamente i 3 grafici, ognuno dei quali con un significato diverso.

Il cerchio verde mostra il segnale così come è stato acquisito, come si vede il segnale ha delle distorsioni nella zona del dielettrico adiacente all'elettrodo di terra e una piccola gobba subito prima dell'elettrodo interno; le distorsioni rende particolarmente difficile l'elaborazione, come si vede nel cerchio blu si ottiene un segnale con un'alta presenza di carica spaziale, improbabile al tempo 0.

Il segnale deconvoluto ha i due picchi relativi agli elettrodi piuttosto evidenti, mentre la parte tra i due, quella che corrisponde all'isolante non ha un andamento piatto, ma una distorsione piuttosto evidente; il segnale dà quindi un'indicazione sbagliata graficando della carica spaziale non esistente ad inizio prova.

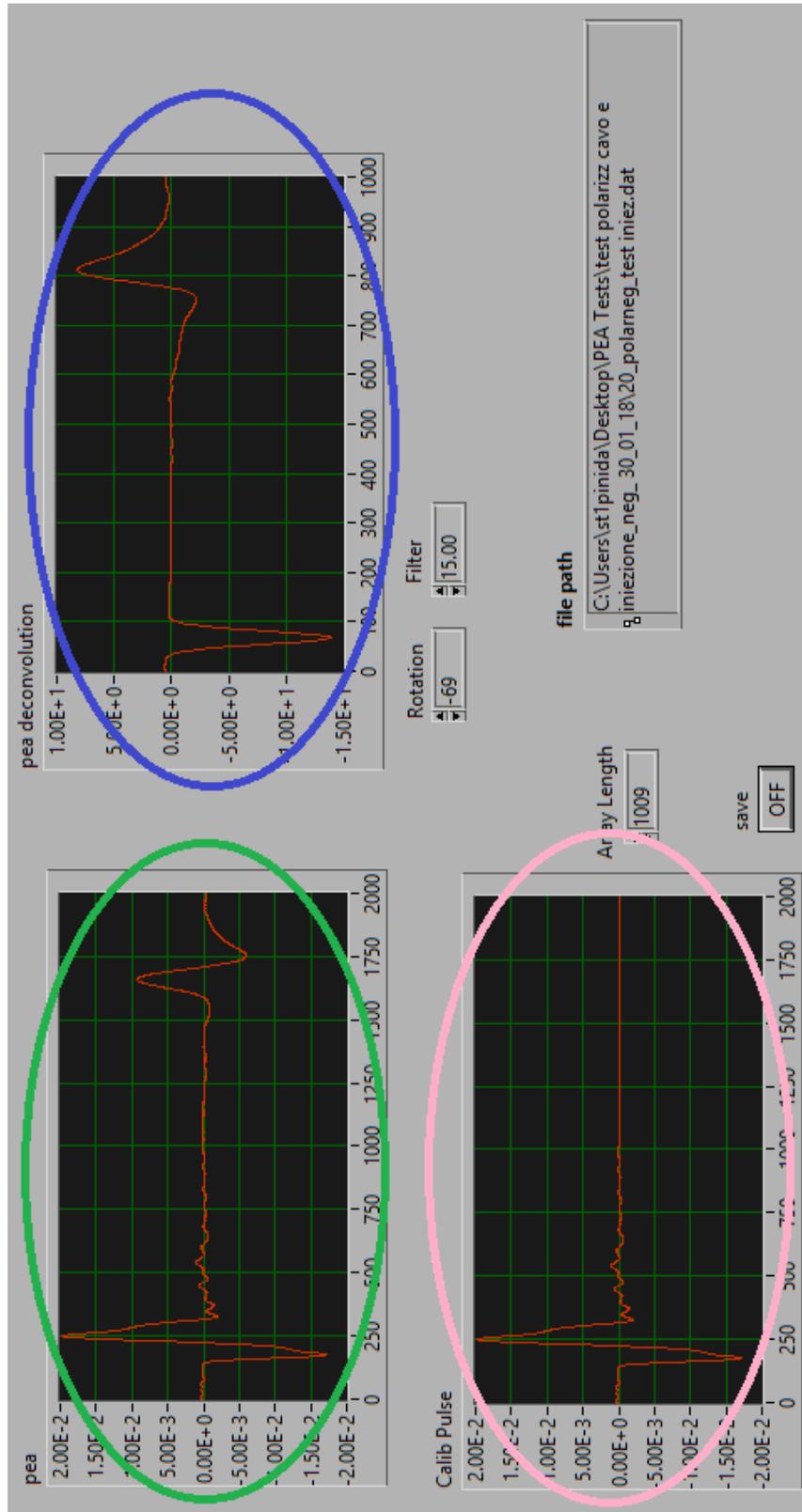


Figura 6.62

Interfaccia del programma di calibrazione con graficata la calibrazione del segnale relativo all'acquisizione 20

6. Le misure PEA nei cavi modello

Come prima si va ad inserire il segnale deconvoluto nell'apposita sezione, come spiegato nel paragrafo 5.7. In questo modo si fa la calibrazione fra i due segnali e il sistema prende il segnale 20 come riferimento, tutte le deformazioni nei segnali successivi verranno viste come l'effetto di una distribuzione di carica. Nei grafici di Figura 6.63 si ha la condizione della distribuzione di carica e di campo elettrico nell'isolante all'istante considerato come istante 0. Per vedere l'evoluzione temporale della carica nel materiale è utile valutare il pattern in tre dimensioni (spessore, tempo, intensità di carica) di Figura 6.64. Si noti come i disturbi nel segnale di misura generino notevoli distorsioni nel pattern della carica e del campo elettrico.

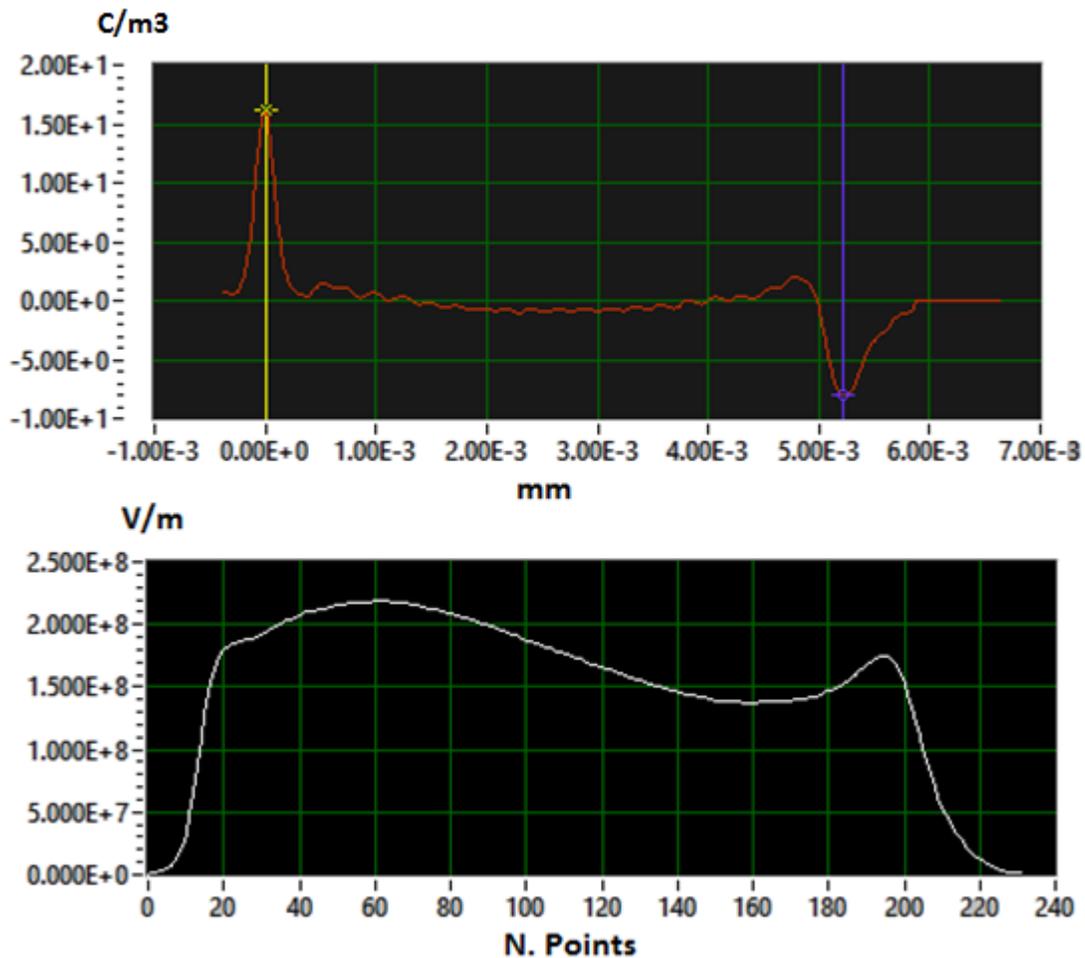


Figura 6.63
Pattern 20

1. Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore.
2. Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo.

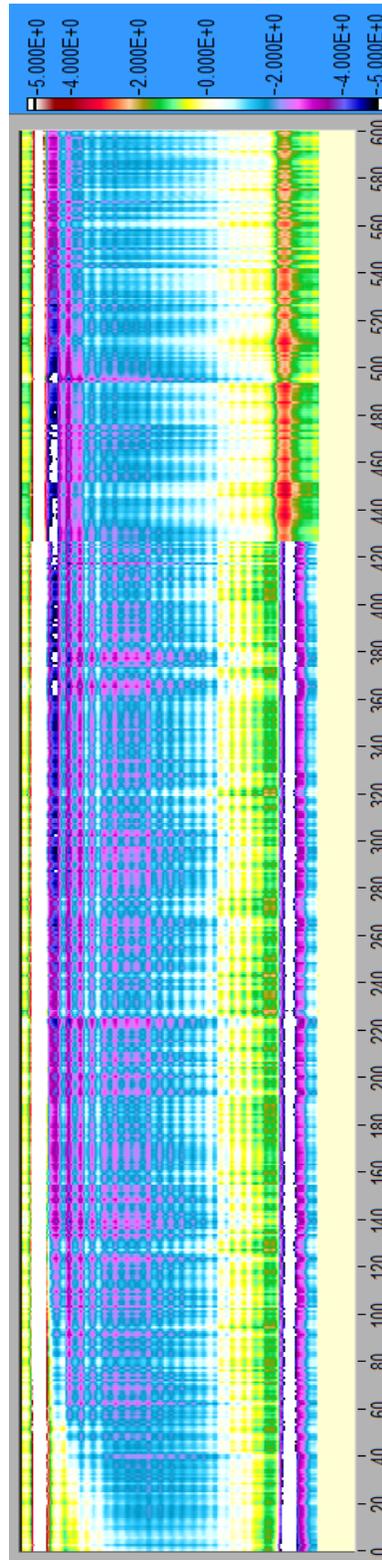


Figura 6.64

Pattern dell'andamento nel tempo della carica lungo lo spessore del cavo. In ascissa si ha il numero di acquisizione, cioè l'evoluzione temporale della prova, l'ordinata corrisponde allo spessore dell'isolante. La legenda dei colori indica la corrispondenza fra il colore e il valore C/m^3

6. Le misure PEA nei cavi modello

Il grafico 6.64 dà una visione complessiva dell'andamento della carica; una volta individuati i periodi corrispondenti a fenomeni di carica si può andare ad analizzare nel dettaglio quei pattern. Ad esempio, in figura si nota che dal 60esimo pattern in poi la condizione nel dielettrico è circa stabile, con una dinamica della carica praticamente nulla. Si va quindi a valutare con maggior precisione l'acquisizione in quella zona con il pattern in Figura 6.65.

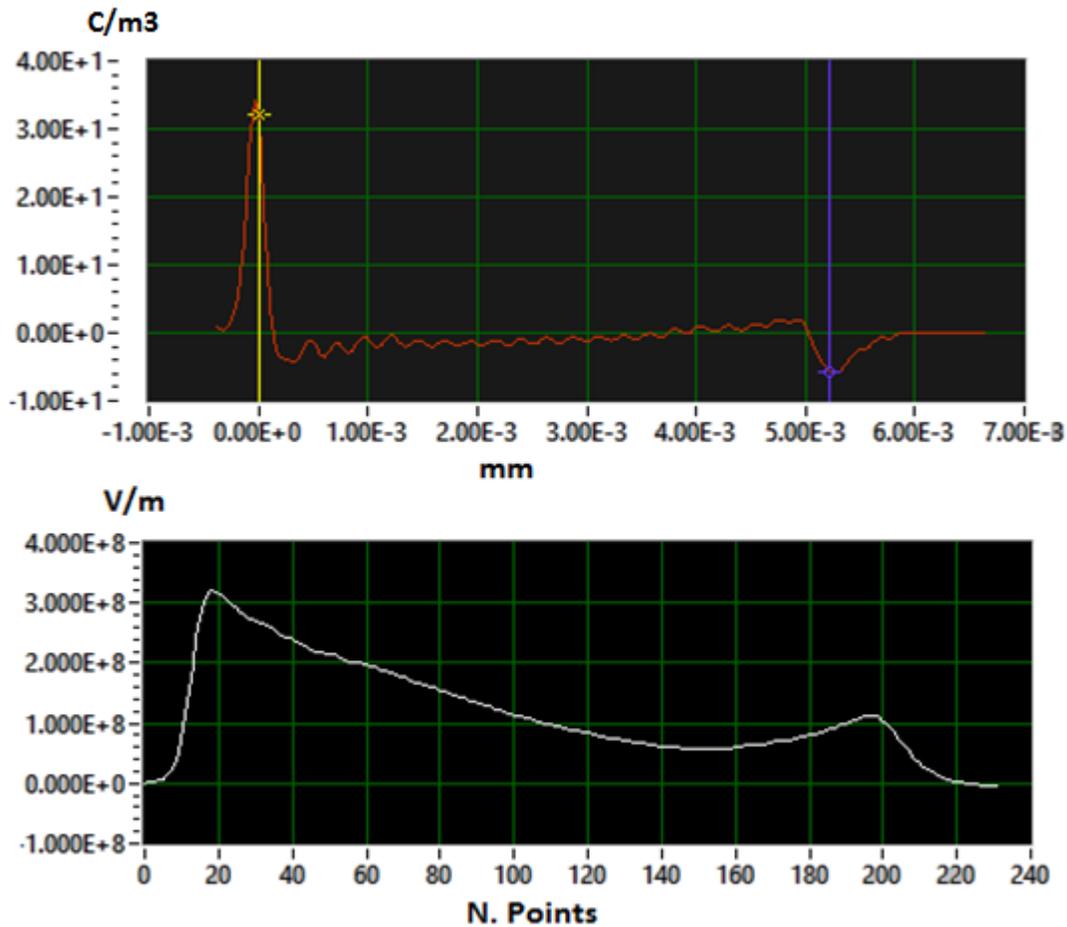


Figura 6.65

Pattern numero 380

1. *Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore.*
2. *Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo.*

Paragonando il pattern di Figura 6.65 con quello di Figura 6.64 si nota una notevole variazione della zona fra gli elettrodi, questo è sinonimo di un'iniezione di carica che, tuttavia, non è pienamente apprezzata in quanto i disturbi falsano la misura. Altro fenomeno degno di nota è l'aumento del picco di terra, dovuto alla presenza di cariche immagine nell'elettrodo.

Anche in questo caso si va a fare una valutazione dell'acquisizione del segnale appena successivo alla volt-off. Il grafico in Figura 6.66 rappresenta la prima acquisizione con il cavo cortocircuitato a terra.

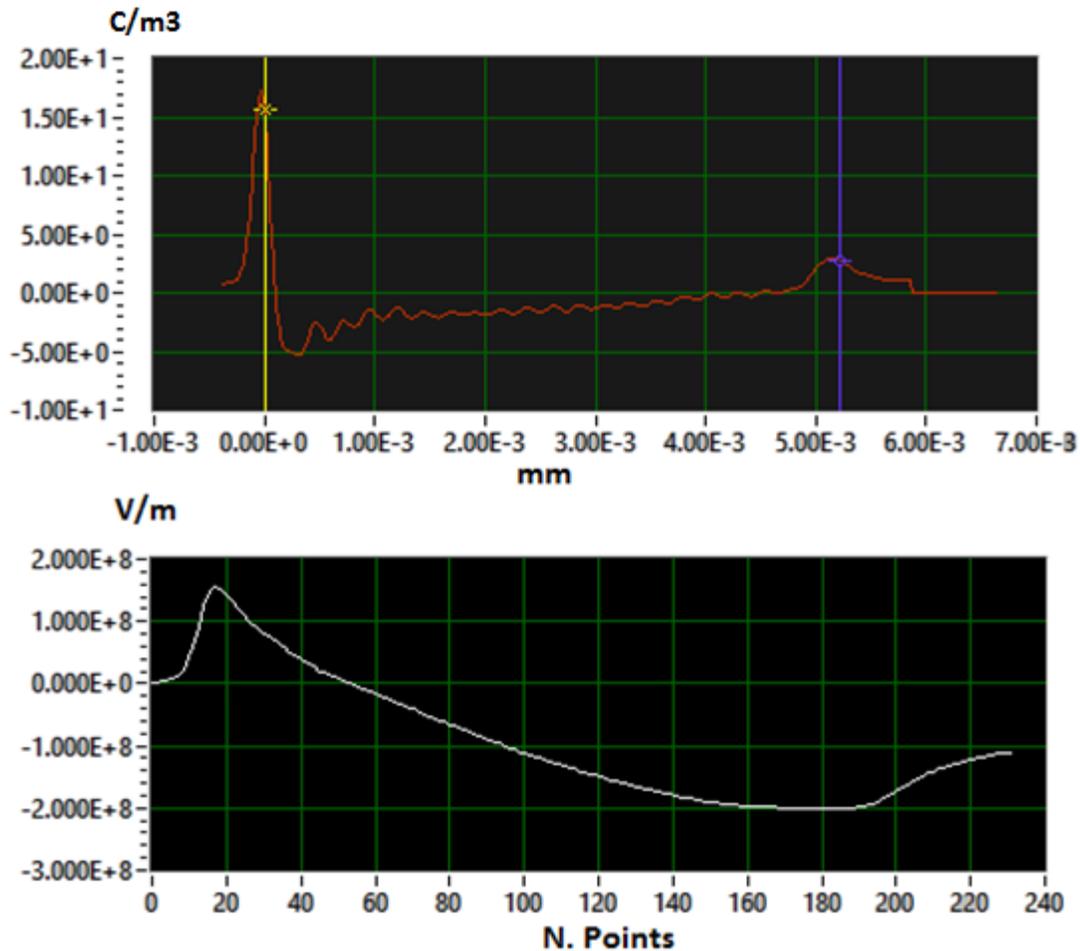


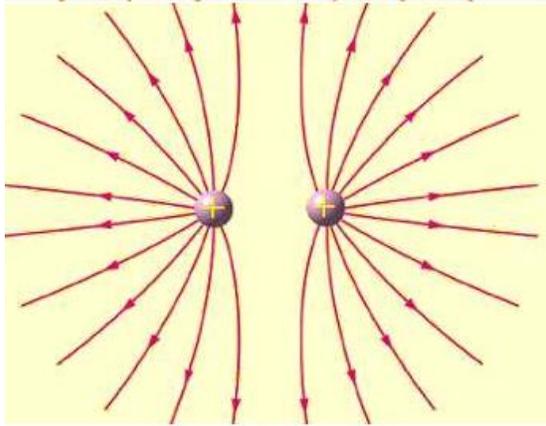
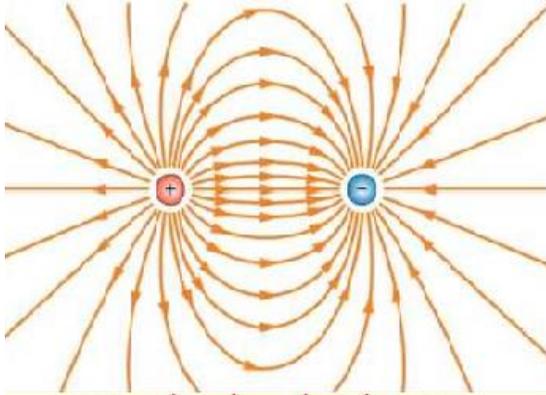
Figura 6.66

Pattern numero 448, primo pattern dopo la volt-off.

1. *Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in C/m^3 in funzione dello spessore*
2. *Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/m in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo*

In questo caso si ha una differenza notevole di segnale dal grafico di Figura 6.60. Infatti in questo caso i disturbi alterano la percezione delle cariche nel dielettrico rendendo impossibile la valutazione della carica intrappolata nel dielettrico.

6. *Le misure PEA nei cavi modello*



CAMPO ELETTRICO DEL METODO PEA

Capitolo 7

Nel seguente capitolo si tratterà delle distorsioni del campo elettrico nell'isolante dovute alle cariche spaziali, verrà inoltre discusso il metodo di calcolo del campo elettrico sin ora adottato.

7. CAMPO ELETTRICO DEL METODO PEA

Come si è discusso nel Capitolo 2 il campo elettrico in DC non è facile da stimare, questo perché è dipendente dalla conducibilità del materiale che a sua volta varia in funzione della temperatura e del campo elettrico stesso. La variabilità del campo la si vede in Figura 7.1 dove è riportato il campo elettrico in DC in funzione del gradiente termico.

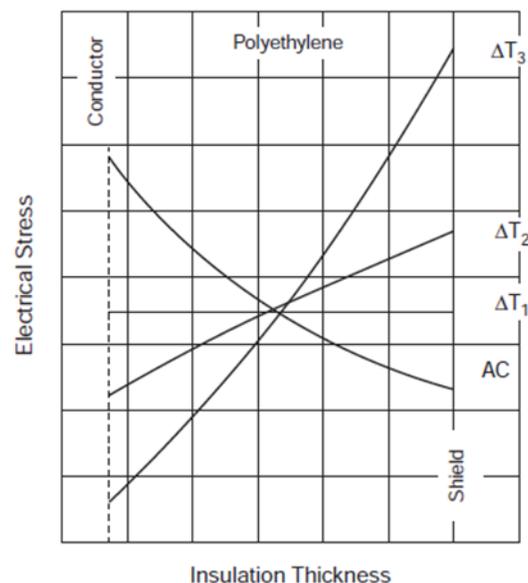


Figura 7.1

Campo elettrico in un cavo DC isolato con PE al variare del gradiente di temperatura ($\Delta T_1 < \Delta T_2 < \Delta T_3$).

La dipendenza del campo da parametri anche esterni alla misura rende particolarmente complesso il calcolo di esso negli isolanti dei cavi, soprattutto in presenza di altre cariche; in realtà il calcolo può essere fatto basandosi su alcune approssimazioni, tuttavia si otterrebbe un risultato non sempre vicino alla realtà.

L'importanza della valutazione del campo è data dal significato della prova PEA stessa, dato che questa misura viene fatta per valutare la distorsione del campo elettrico nell'isolante, causata dalla carica spaziale che si viene a formare nel dielettrico.

Questo effetto è quello che lo standard IEEE 1732-2017 [3] richiede di considerare durante le misure. Di seguito verrà riportato il metodo secondo il quale deve essere svolta la misura di carica spaziale (i punti non verranno riportati pedissequamente dalla norma, ma verranno evidenziati gli aspetti più interessanti).

7. Campo elettrico del metodo PEA

Prima dell'inizio del type test, piuttosto che del prequalification test, deve essere svolta una prova di carica spaziale sul cavo, così detto vergine, al gradiente di temperatura nominale di funzionamento. Questa prova consta in una sola acquisizione, viene quindi utilizzata come prova di calibrazione per avere un pattern sicuramente privo di cariche nel dielettrico.

Dopo che il cavo ha affrontato il test deve essere rimossa una porzione di schermo sufficiente per poter applicare il setup per la misura PEA; a questo punto viene svolta la prova come segue.

- 1) Il cavo deve essere riscaldato e mantenuto in un range da -5°C a $+10^{\circ}\text{C}$ della temperatura di funzionamento per almeno 10 ore.
- 2) Si applica la tensione nominale al cavo; appena si raggiunge il valore nominale di tensione si fa una misura, che corrisponderà alla misura a $t=0$, facendo così partire la prova di volt-on con polarità positiva.
- 3) Devono essere fatte sei misure a distanza di 30 minuti l'una dall'altra
- 4) La variazione massima di campo elettrico tra una e l'altra viene valutata; se la variazione eccede il 5% la prova continua con altre 6 acquisizioni, una ogni 30 minuti.
- 5) Trascorso il tempo richiesto si può rimuovere tensione applicata al cavo.
- 6) Il generatore deve essere messo a terra, avendo quindi un cortocircuito fra schermo e conduttore; la fase di messa a terra non deve durare più di 5 minuti.
- 7) Non appena il cavo viene vincolato al potenziale di terra si fa una misura che coincide con la misura al $t=0$ della volt-off; parte quindi la prova di volt-off.
- 8) Vengono fatte quattro misure, una ogni 30 minuti.
- 9) Il cavo deve avere un periodo di riposo di almeno 24 ore durante il quale è collegato a terra.
- 10) Si applica ora la tensione nominale in polarità negativa; appena si raggiunge il valore nominale di tensione si fa una misura, che corrisponderà alla misura a $t=0$, facendo così partire la prova di volt-on con polarità negativa.

La prova prosegue come dal punto 5 in poi fino a fine test.

È quindi di fondamentale importanza poter calcolare il campo elettrico in un isolante tenendo in considerazione il contributo della carica spaziale. C'è da considerare che il campo elettrico in un cavo non è un campo costante, ma variabile in funzione del raggio. Per il calcolo del campo non è quindi sufficiente sovrapporre l'effetto delle cariche di spazio ad un valore costante dato dalla relazione $E=V/d$, ma è necessario valutare il campo secondo le equazioni di Maxwell.

Le valutazioni sulla distribuzione di campo sono state fatte tramite COMSOL; si è imposta una tensione ai capi del dominio e calcolata la distribuzione di campo, questa è stata sovrapposta al campo risultante dalla distribuzione di carica spaziale valutata tramite metodo PEA.

7.1 Effetto della carica di spazio sul campo elettrico DC nei cavi a temperatura ambiente

Una distribuzione di carica nel materiale dielettrico implica la formazione di un campo elettrico che, secondo il principio di sovrapposizione degli effetti, si va a sovrapporre al campo elettrico generato. Questo è dovuto al fatto che ogni carica genera un campo elettrico a seconda della legge espressa con l'equazione (7.1).

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (7.1)$$

Una volta ottenuta la distribuzione di carica nel materiale è quindi possibile calcolare il campo, più o meno distorto, applicato all'isolante del cavo. Per ottenere questo risultato possono sostanzialmente essere seguite due diverse strade; entrambe partono dal presupposto che la rilevazione di carica nel materiale sia fatta in maniera corretta e rispecchi la realtà.

Le due soluzioni di seguito riportate differiscono in quanto una deriva da una simulazione tramite COMSOL utilizzando il pattern di carica misurato, la seconda invece utilizza una conversione ad hoc in modo che il pattern ottenuto sia direttamente convertibile nel campo elettrico applicato al materiale.

7.1.1 Valutazione del campo con il metodo della simulazione

Il campo elettrico in un conduttore non è costante radialmente, ma ha un gradiente elettrico. Per questo motivo è necessario fare in primo luogo una valutazione del campo applicato esternamente all'isolante. Per far ciò è necessario partire dalle equazioni base dell'elettromagnetismo, con le equazioni di Maxwell è quindi possibile definire su COMSOL il tipo di calcolo che il programma deve fare per ottenere l'effetto dato dal potenziale esterno.

Le equazioni utilizzate in questa valutazione sono la (7.2) e la (7.3).

7. Campo elettrico del metodo PEA

$$E = -\nabla V \quad (7.2)$$

$$J = \sigma(E, T)E + J_e \quad (7.3)$$

Dove E è il campo elettrico e V il gradiente applicato; J è la densità di corrente nel materiale, il pedice e sta ad indicare una densità esterna. La conducibilità $\sigma(E, T)$ è il parametro caratterizzante del campo in DC, questa dipende a sua volta dalla temperatura e dal campo elettrico stesso.

Viene da sé che, essendo una configurazione cilindrica, le equazioni saranno trattate dal programma con coordinate cilindriche.

Il calcolo del campo elettrico è quindi ottenuto dalle formule (7.2) e (7.3), l'andamento in funzione della coordinata radiale è rappresentato in Figura 7.2.

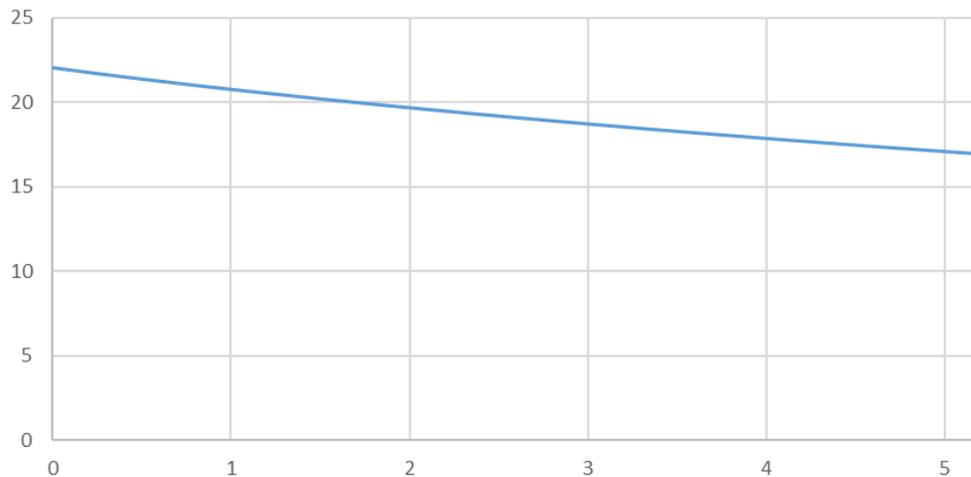


Figura 7.2

$kV/mm - r - r_c$

Campo elettrico radiale del cavo in funzione dello spessore dell'isolante (5.2 mm).

Il grafico rappresenta l'andamento del campo elettrico nell'isolante, quindi il punto indicato con 0 in ascissa è in realtà la superficie di separazione tra conduttore e isolante che, riferendosi al centro del cavo, corrisponde col raggio del conduttore r_c . Come si vede si ha un andamento inversamente proporzionale al raggio, diversamente al caso di geometria piana dove il campo è costante.

Al campo impresso va quindi sommato il campo generato dalle cariche intrappolate nelle buche di potenziale; per ottenere questo campo si utilizza la distribuzione di carica fornita dall'acquisizione PEA spiegata nel Capitolo 4. Il pattern utilizzato è quello deconvoluto e calibrato, quindi si assumono corrette le elaborazioni dei programmi attualmente in uso.

In particolare l'esempio verrà fatto con il pattern 226 dell'acquisizione del paragrafo 6.6.1.

In Figura 6.3 è raffigurata la distribuzione di carica spaziale ottenuta. Il pattern è stato epurato dei picchi relativi agli elettrodi, infatti questi picchi rappresentano la causa del campo applicato dall'esterno, dato che in questa simulazione il campo è calcolato matematicamente non è necessario tener conto delle cariche sull'interfaccia. Per semplicità di rappresentazione i grafici vanno da 0, che corrisponde all'interfaccia conduttore-isolante, a 5.2 che corrisponde all'interfaccia isolante-schermo.

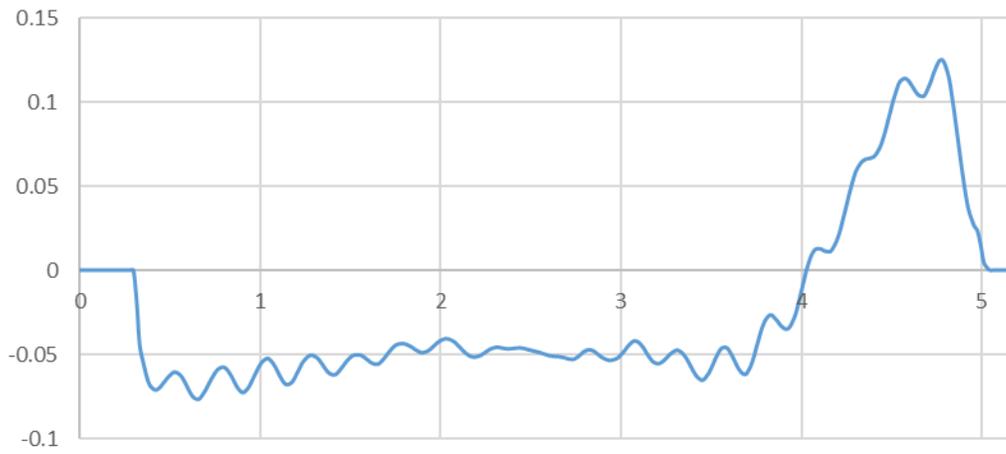


Figura 7.3

$C/m^3 - mm$

Distribuzione di carica misurata nel dielettrico del cavo priva dei picchi associati agli elettrodi.

Da questa distribuzione di carica si risale al campo elettrico generato dalle cariche. Per far ciò si usa ancora una volta il principio di sovrapposizione degli effetti, in particolare si usa l'equazione (7.1) per calcolare il campo elettrico generato dalle cariche della, tutti i contributi verranno quindi sommati per ottenere l'effetto globale.

La Figura 7.4 rappresenta il contributo delle cariche di Figura 7.3.

7. Campo elettrico del metodo PEA

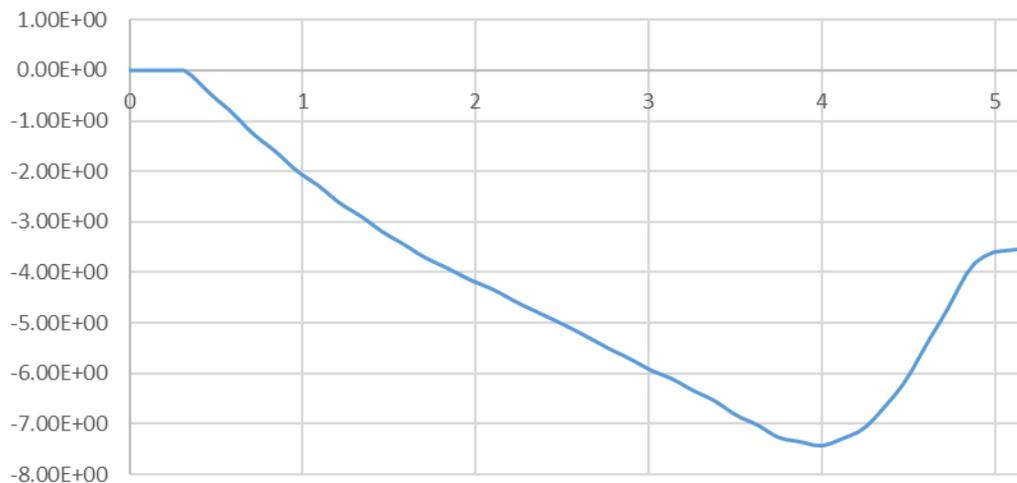


Figura 7.4
kV/mm – mm
Distribuzione del campo elettrico generato dalla distribuzione di carica spaziale.

Il risultato finale è quindi dato dalla somma dei contributi del grafico in Figura 7.2 e da quello in Figura 7.4; si ottiene quindi il campo elettrico applicato al cavo che è rappresentato in Figura 7.4.

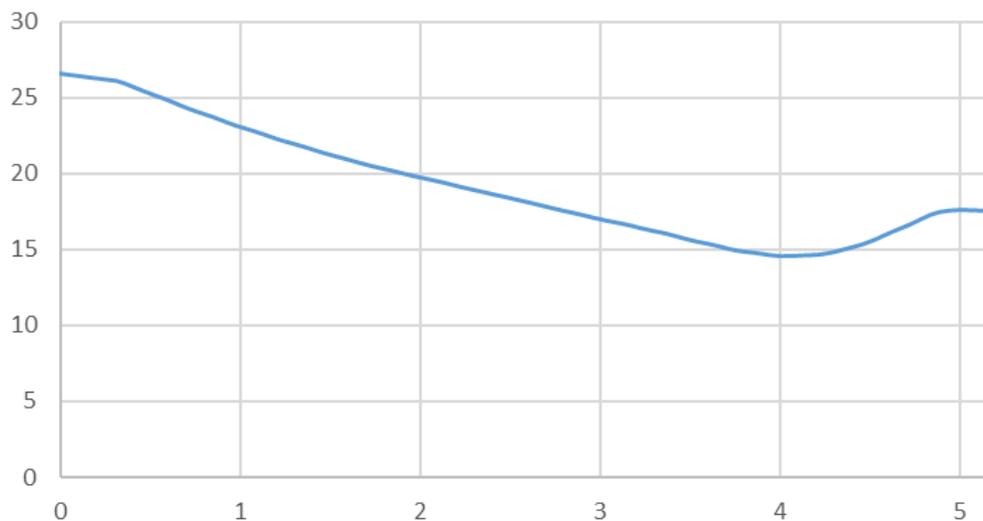


Figura 7.5
kV/mm – mm
Distribuzione del campo elettrico nell'isolante del cavo.

C'è da considerare che la simulazione in COMSOL fa una semplice somma dei campi calcolati, se ora si integrasse il risultato, applicando la formula inversa della (7.2) non si otterrebbe il potenziale di prova. Questo è un errore di calcolo, nella realtà il generatore continua ad imprimere il medesimo potenziale e non viene perturbato dalla distribuzione di carica.

Per avere un risultato realistico si deve quindi sommare al potenziale esterno un potenziale pari alla differenza creata dalla carica spaziale. In questo caso è come se la tensione applicata al cavo non sia variata e si ha quindi il gradiente elettrico tale da ricondurre alla U_{test} .

Si sono così ottenuti gli andamenti che caratterizzano il gradiente elettrico nell'isolante, di particolare interesse sarà quindi la Figura 7.5 che rappresenta il campo elettrico nell'isolante.

In Figura 7.6 sono presenti i vari andamenti nello stesso grafico.

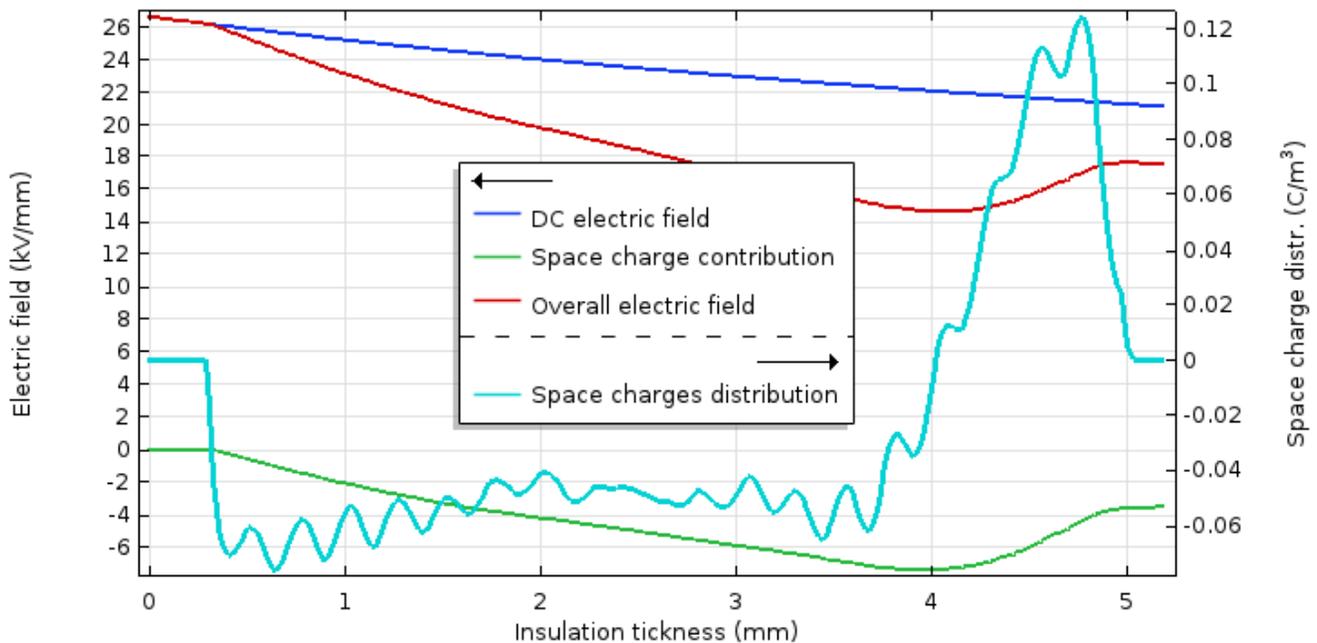


Figura 7.6

Nel grafico sono uniti i risultati delle Figure 7.5, 7.4, 7.3 e 7.2.

Come si può osservare nella Figura 7.6 si ha il campo elettrico DC che non è lo stesso di partenze della Figura 7.2, ma è un campo maggiore. Questo è appunto all'artificio utilizzato per mantenere costante il potenziale applicato al cavo.

In rosso si ha il campo elettrico risultante in presenza di carica di spazio. Il campo elettrico, ora, raggiunge dei massimi diversi rispetto al caso del solo campo esterno e il suo andamento non è più monotono. È quindi importante osservare che lo stress elettrico massimo nell'isolante è maggiore rispetto a quello che si ha senza cariche di spazio.

Nella Figura 7.7 viene fatta una rappresentazione 3d del campo elettrico sull'isolante. Ci si riferisce ad una sezione di cavo modello che viene rappresentata in assenza di contributo delle cariche spaziali (metà sx) e in presenza di cariche spaziali, quindi del loro contributo (metà dx).

7. Campo elettrico del metodo PEA

Mentre in assenza di carica spaziale il campo ha una variazione costante e contenuta, le cariche rilevate causano una deformazione tale da ridurre lo stress su alcuni punti, ma da aumentarlo in altri.

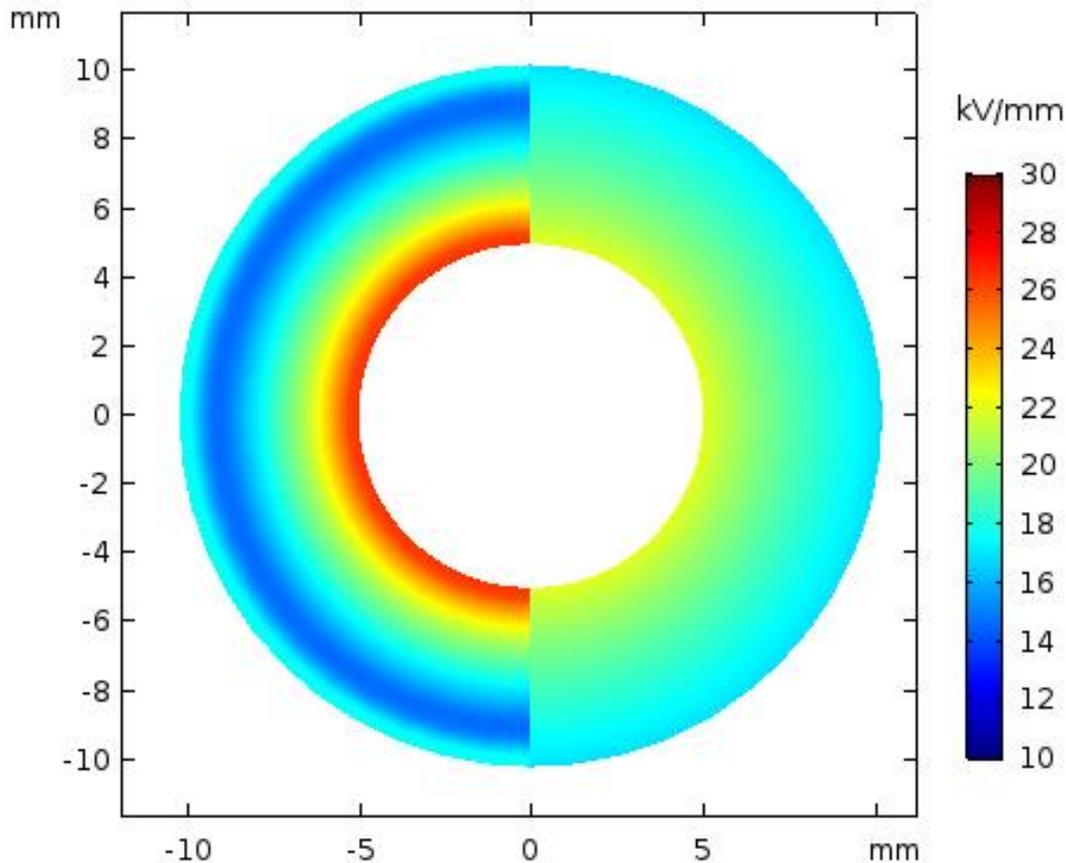


Figura 7.7

Sezione di un cavo modello evidenziando la distribuzione del campo elettrico con e senza contributo della carica spaziale.

7.1.2 Valutazione del campo con il metodo della conversione del pattern

Il metodo del paragrafo precedente richiede una simulazione nella quale vengono introdotti degli accorgimenti in quanto il mondo virtuale non rispecchia a pieno quello reale. Per evitare di utilizzare simulazioni, quindi calcoli lunghi e ideali, si potrebbe sviluppare un metodo basato interamente sulla valutazione del pattern acquisito. Di seguito verrà spiegata l'idea alla base di questo metodo, ma non la sua realizzazione, l'intenzione di questo paragrafo è infatti quella di dare dei suggerimenti per sviluppi futuri.

Per comodità sui ragionamenti si riporta in Figura 7.8 un pattern acquisito nel corso delle prove.

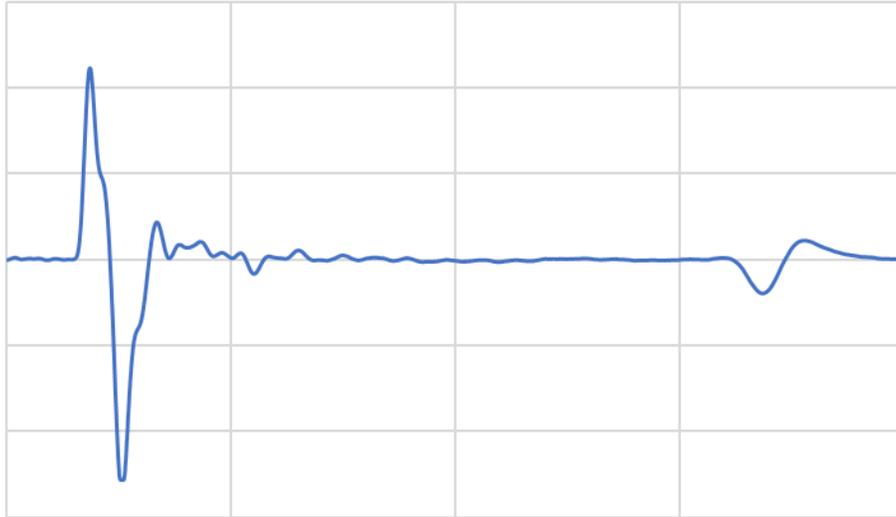


Figura 7.8
mV – N° punti
Segnale restituito dal trasduttore piezoelettrico.

Come già menzionato i picchi esterni sono relativi alle cariche sull'interfaccia elettrodo-isolante, quindi rappresentano la causa fisica del potenziale esternamente applicato.

Come prima cosa sarà necessario eliminare l'oscillazione del picco data dal circuito RC dello stadio amplificativo della cella; operazione fattibile conoscendo la funzione di trasferimento del sistema, come spiegato nel paragrafo 5.7.

A questo punto si può quindi pensare di calibrare il segnale in maniera tale che il contributo dei picchi dia un campo elettrico tale che, integrato, si ottenga il potenziale applicato dal generatore (quindi il campo di Figura 7.2).

La relazione fra i picchi misurati dal piezoelettrico e il campo elettrico imposto da quindi un coefficiente α che può essere utilizzato per la conversione del segnale di tensione in mV a quello della distribuzione di carica in C/m³.

$$\alpha(U_{test, acq}) : \left[\frac{C}{mV m^3} \right] \quad (7.4)$$

7. Campo elettrico del metodo PEA

Per verificare che α sia corretta si moltiplicano i picchi degli elettrodi per tale coefficiente, si applica quindi l'equazione (7.1) per valutare l'effetto di ogni carica e sommarlo agli altri; a questo punto, applicando la formula inversa della (7.2) si dovrà ottenere la U_{test} .

Se il coefficiente è corretto si può quindi moltiplicare tutto il segnale acquisito per α ottenendo così la completa distribuzione di carica.

Tuttavia è possibile saltare un ulteriore passaggio e implementare l'algoritmo che, dopo la calibrazione e la definizione di α , fornisca direttamente il valore del campo elettrico. In questo modo si potrebbe fare anche una valutazione in diretta del campo sul cavo durante la prova PEA; infatti, appena si acquisisce il pattern, questo può essere processato tramite i due parametri per ottenere il campo.

7.2 Effetto combinato gradiente termico-carica di spazio sul campo elettrico

Come si è spiegato nel Capitolo 2 il campo elettrico in DC è fortemente influenzato dal gradiente termico a cui si trova il materiale. Per completezza si è deciso di usare il metodo mostrato nel paragrafo 7.1.1 per fare un confronto fra un caso a prova ambiente e uno che ha un riscaldamento interno di 80°C .

La Figura 7.2 mostra l'andamento del campo elettrico nell'isolante di un cavo a temperatura ambiente; in Figura 7.9 viene invece mostrato l'andamento del campo elettrico simulando il riscaldamento del conduttore.

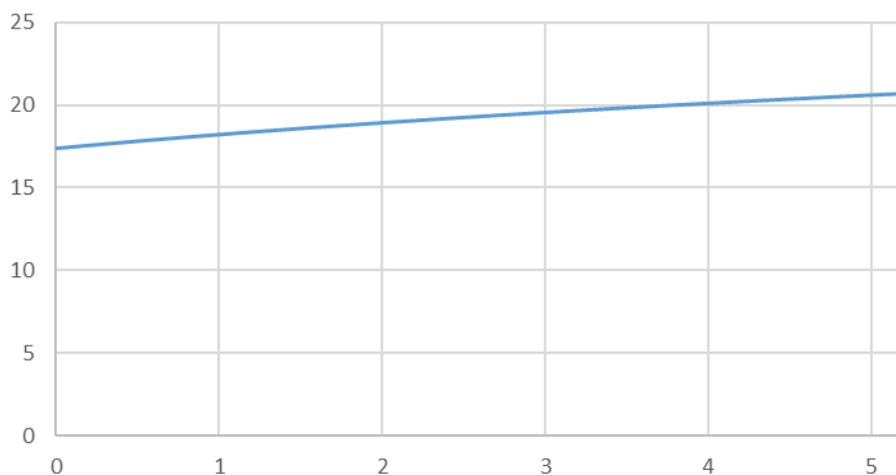


Figura 7.9

$kV/mm - r - r_c$

Campo elettrico radiale del cavo in funzione dello spessore dell'isolante (5.2 mm) nel caso di un gradiente termico generato da un riscaldamento di 80°C sul conduttore.

Si nota quindi il fenomeno dell'inversione di campo causato dal gradiente termico del cavo. Questo fenomeno porta quindi ad una condizione in cui il campo all'esterno è più alto di quello all'interno del cavo.

Per fare la simulazione si è utilizzata la stessa distribuzione di carica utilizzata per l'esempio nel paragrafo 7.1.1. Nella realtà, riscaldando il dielettrico, si ha una variazione di conducibilità e quindi è plausibile che le cariche non si dispongano alla stessa maniera del caso a temperatura ambiente; nonostante ciò si è voluta dare un'idea su come l'effetto della temperatura influenzi la distribuzione di campo combinata ad una distribuzione di carica spaziale.

In Figura 7.10 si ha ancora la raffigurazione degli andamenti delle varie componenti della misura. In rosso si ha sempre l'andamento del campo elettrico risultante dalla somma di quello in Figura 7.9 con quello generato dalla distribuzione delle cariche di spazio di Figura 7.4.

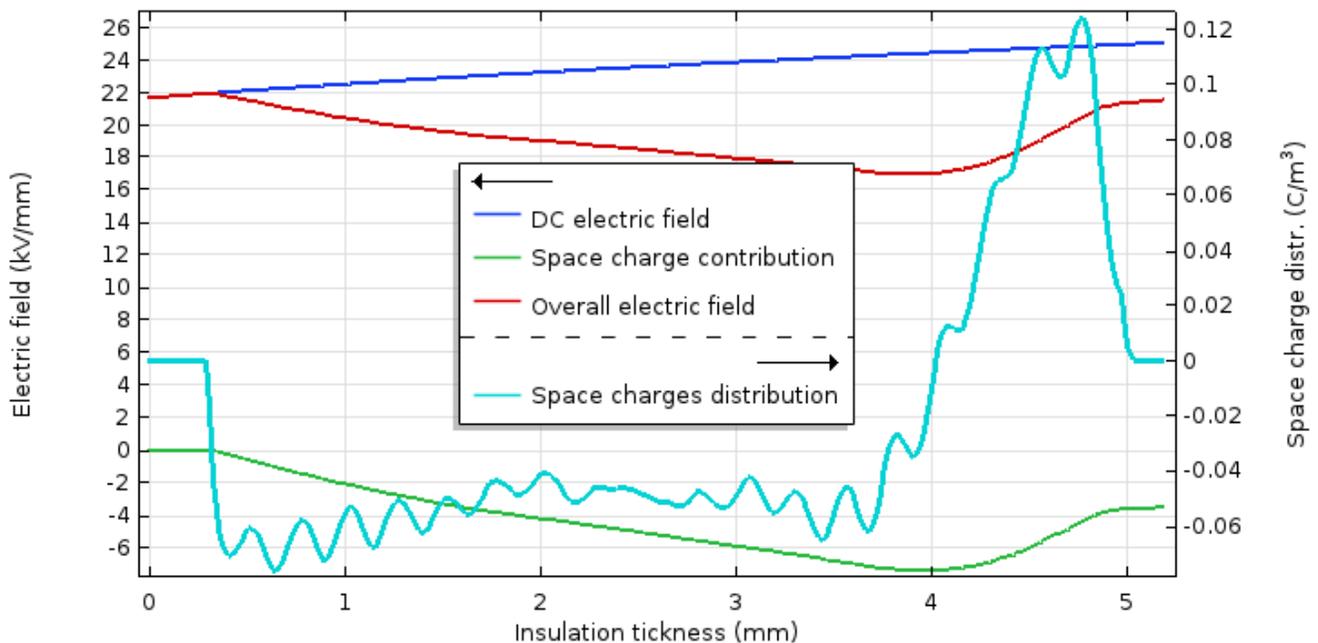


Figura 7.10

Distribuzione del campo elettrico e delle cariche nell'isolante del cavo.

Mentre nel caso precedente il campo elettrico aveva una variazione consistente, in questo caso lo si può considerare con un valor medio costante. L'effetto dell'inversione di campo può portare quindi ad una condizione simile a quella dei provini piani, dove il materiale è stressato uniformemente.

Inoltre in Figura 7.8 si ha che la carica spaziale aumenta il valore del campo massimo e diminuisce il minimo nell'isolante, mentre in Figura 7.10 si nota che il campo massimo rimane invariato a patto di una più costante sollecitazione sul materiale.

7. Campo elettrico del metodo PEA

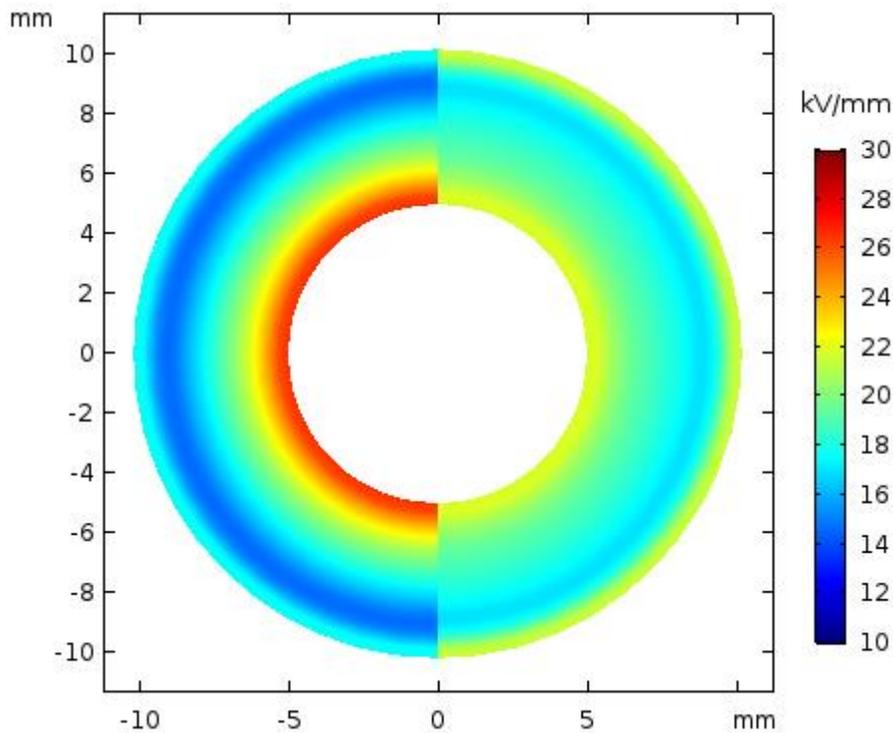


Figura 7.11

Sezione di un cavo modello evidenziando la distribuzione del campo elettrico nel caso di cavo a prova ambiente e in quello di cavo riscaldato.

Con la Figura 7.11 è ancor più immediato il confronto. La metà di sinistra rappresenta il campo nel conduttore alla condizione di temperatura ambiente, quella di destra, invece, rappresenta il campo elettrico nel caso in cui vi sia una fonte di calore interna alla temperatura di 80°C.

Osservando i colori si ha un confronto ancor migliore per confermare ciò che è già stato detto in presenza del contributo dato dalla carica di spazio. Nel caso di assenza di riscaldamento la presenza di carica spaziale porta ad un aumento del campo massimo applicato all'isolante, inoltre anche la differenza della sollecitazione elettrica si acuisce in direzione radiale. In presenza di riscaldamento si ha che la sollecitazione è massima negli estremi dell'isolante, ma di valore non superiore alla sollecitazione massima che si aveva senza carica spaziale, ed è ridotta nel centro del cavo, tuttavia si ha una sollecitazione piuttosto uniforme.



LE MISURE PEA SUI CAVI FULL SIZE – IL PROGETTO IFA2

Capitolo 8

Nel seguente capitolo si tratterà delle prove svolte sui cavi full size appartenenti al progetto IFA2.

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2

8. LE MISURE PEA SUI CAVI FULL SIZE – IL PROGETTO IFA2

Nel 2012, con la raccomandazione *cigrè DI-202* [12], sono state trattate per la prima volta, a livello normativo, le prove di carica spaziale PEA sui cavi full size. Nel 2017 è stata poi pubblicata la raccomandazione IEEE Std 1732-2017 [3] dove viene descritto il procedimento consigliato per svolgere le prove di carica spaziale.

In seguito a queste norme gli acquirenti di cavi sempre più spesso richiedono delle misure di carica spaziale sui cavi HVDC da loro commissionati. Non essendo ancora delle norme, ma solo delle raccomandazioni, al momento i pochi test di carica spaziale svolti sui cavi full size sono a solo scopo informativo e di ricerca. È questo il caso del progetto IFA2.

Questo capitolo utilizzerà proprio il report informativo redatto da Prysmian, arrangiato, in maniera da poter descrivere le misure svolte sui cavi relativi al progetto.

Si premette che per motivi di proprietà intellettuale il capitolo non presenterà alcun valore numerico, come non saranno descritte le dimensioni dei cavi o dei sistemi in prova, se non relativi al setup della prova PEA; ci si attendano quindi dei grafici privi di valori numerici, verrà quindi fatta una valutazione puramente qualitativa della misura. Qualsiasi valore menzionato non è da considerarsi un numero realmente misurato.

Le prove sono state fatte su 3 cavi i quali avevano comunque uno spessore dell'isolante simile in quanto appartenenti allo stesso sistema elettrico; i cavi non verranno identificati con il loro nome, ma con un numero (cavo1, cavo2, cavo3).

8.1 Il progetto IFA2

IFA è l'acronimo di *Interconnexion France-Angleterre*, il numero 2 deriva dal fatto che questo è il secondo progetto del genere. Si parla di un'interconnessione elettrica fra Francia ed Inghilterra al di sotto del Canale della Manica. La connessione sarà lunga 204 km opererà ad una tensione di funzionamento di +/- 320 kV con una capacità di trasmissione di potenza di 1000 MW.

Il progetto è stato sviluppato dall'unione di *UK National Grid* e *RTE of France*, l'assegnazione del contratto è stata vinta da Prysmian.

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2

Il numero 2 deriva dal fatto che questa connessione è la seconda del suo genere, in Figura 8.1 si possono vedere entrambe le connessioni dei progetti IFA. In Figura 8.1 si hanno i due collegamenti IFA.



Figura 8.1
Progetti IFA.

Il progetto avrà una parte del cavo sulla terra ferma, mentre la parte restante verrà calata sotto il canale della manica. La connessione sarà fra la Normandia, per quanto riguarda il lato francese, e Southampton per quanto riguarda quello inglese.

In Figura 8.2 viene mostrato il cavo marino utilizzato per questo collegamento.

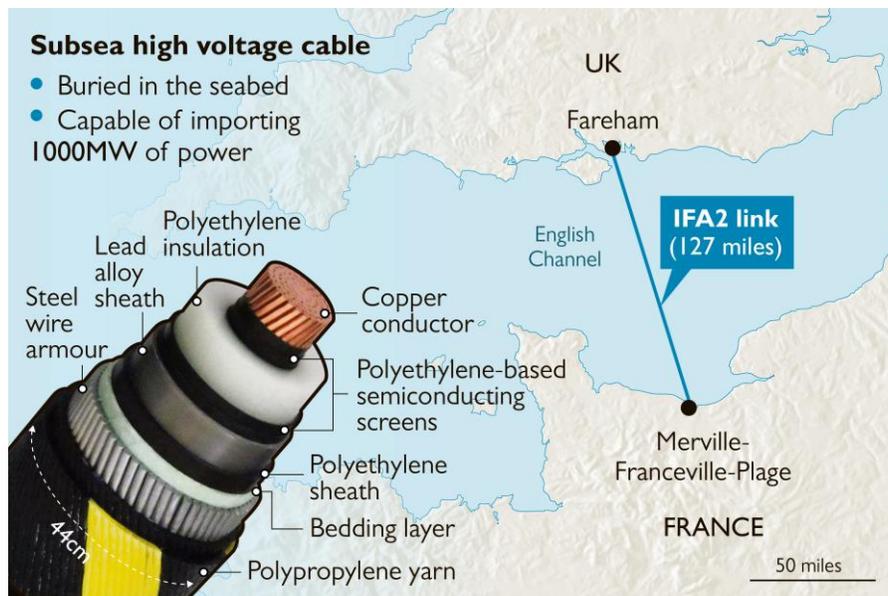


Figura 8.2
Collegamento IFA2 con particolare del cavo marino che attraverserà il canale della Manica.

8.2 Modalità di prova

La procedura con la quale svolgere il test è stata concordata fra cliente e costruttore del cavo. Si è deciso di non seguire pedissequamente la raccomandazione IEEE, ma di adottare lo stesso procedimento utilizzato nella misura PEA svolta sulla connessione Francia-Italia (un altro progetto che aveva visto coinvolte RTE e Prysmian in precedenza).

Il procedimento è di seguito elencato e, come si vede, ha delle analogie con il procedimento preso dal IEEE Std 1732-2017 e menzionato nel Capitolo 7.

- 1) Il cavo deve essere riscaldato e la temperatura del conduttore deve essere mantenuta in un range attorno alla sua massima temperatura di funzionamento ($-5^{\circ}\text{C} \div +10^{\circ}\text{C}$) per almeno 10 ore.
- 2) La tensione nominale deve essere applicata fra conduttore e schermo (a terra) in polarità positiva. Non appena la tensione ha raggiunto il valore di prova viene svolta la prima misura. Questa misura rappresenta il tempo zero di riferimento della misura di volt-on ($t_{\text{ON}+}=0$) con polarità positiva.
- 3) Devono essere fatte sei ulteriori misure in sequenza distanziate di 30 minuti l'una dall'altra. Si avrà quindi: $t_{\text{ON}+}=0.5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=1\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=1.5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=2\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=2.5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=3\text{h}$.
- 4) La variazione di tensione fra i profili di campo ottenuti nelle misure $t_{\text{ON}+}=2.5\text{h}$ e $t_{\text{ON}+}=3\text{h}$ devono essere confrontati; se la variazione è maggiore del 5% sei ulteriori misure devono essere fatte, una ogni 30 minuti. Si avrà quindi: $t_{\text{ON}+}=3.5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=4\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=4.5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=5.5\text{h}$, $t_{\text{ON}+}=6\text{h}$.
- 5) Dopo l'ultima misura la tensione applicata deve essere rimossa. La variazione di campo fra le ultime due misure ($t_{\text{ON}+}=5.5\text{h}$ e $t_{\text{ON}+}=6\text{h}$) deve essere valutata a solo scopo informativo.
- 6) Il cavo deve essere messo a terra e cortocircuitato con il suo schermo. L'operazione di messa a terra non deve durare più di 5 minuti.
- 7) Appena viene assicurata la messa a terra deve essere fatta una prima misura di volt-off. Questa misura rappresenta il tempo zero di riferimento della misura di volt-off ($t_{\text{OFF}+}=0$) con polarità positiva.
- 8) In fase di volt-off devono essere svolte quattro misure ad intervalli di 30 minuti: $t_{\text{OFF}+}=0.5\text{h}$, $t_{\text{OFF}+}=1\text{h}$, $t_{\text{OFF}+}=1.5\text{h}$, $t_{\text{OFF}+}=2\text{h}$.
- 9) Il cavo deve avere un periodo di riposo (collegato a terra) di almeno 24 ore.
- 10) La tensione nominale deve essere applicata fra conduttore e schermo (a terra) in polarità negativa. Non appena la tensione ha raggiunto il valore di prova viene svolta la prima misura. Questa misura rappresenta il tempo zero di riferimento della misura di volt-on ($t_{\text{ON}-}=0$) con polarità positiva.

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2

- 11) Devono essere fatte sei ulteriori misure in sequenza distanziate di 30 minuti l'una dall'altra. Si avrà quindi: $t_{ON}=0.5h$, $t_{ON}=1h$, $t_{ON}=1.5h$, $t_{ON}=2h$, $t_{ON}=2.5h$, $t_{ON}=3h$.
- 12) La variazione di tensione fra i profili di campo ottenuti nelle misure $t_{ON}=2.5h$ e $t_{ON}=3h$ devono essere confrontati; se la variazione è maggiore del 5% sei ulteriori misure devono essere fatte, una ogni 30 minuti. Si avrà quindi: $t_{ON}=3.5h$, $t_{ON}=4h$, $t_{ON}=4.5h$, $t_{ON}=5h$, $t_{ON}=5.5h$, $t_{ON}=6h$.
- 13) Dopo l'ultima misura la tensione applicata deve essere rimossa. La variazione di campo fra le ultime due misure ($t_{ON}=5.5h$ e $t_{ON}=6h$) deve essere valutata a solo scopo informativo.
- 14) Il cavo deve essere messo a terra e cortocircuitato con il suo schermo. L'operazione di messa a terra non deve durare più di 5 minuti.
- 15) Appena viene assicurata la messa a terra deve essere fatta una prima misura di volt-off. Questa misura rappresenta il tempo zero di riferimento della misura di volt-off ($t_{OFF}=0$) con polarità negativa.
- 16) In fase di volt-off devono essere svolte quattro misure ad intervalli di 30 min: $t_{OFF}=0.5h$, $t_{OFF}=1h$, $t_{OFF}=1.5h$, $t_{OFF}=2h$.

La norma non definisce il setup di prova, questo lascia libertà d'azione per poter migliorare il segnale acquisito. Tuttavia la prova è stata fatta con la revisione dell'azienda produttrice del sistema PEA che ha certificato che la configurazione utilizzata è quella ottimale per le misure.

8.3 Setup della misura

Le caratteristiche del circuito di misura non sono sostanzialmente diverse da quelle utilizzate per la prova nel paragrafo 6.6. in Figura 8.3 è riportato lo schema della cella PEA e di come venga adagiato il cavo su di essa, mentre in Figura 8.4 si ha la rappresentazione del circuito di misura utilizzato per i 3 cavi.

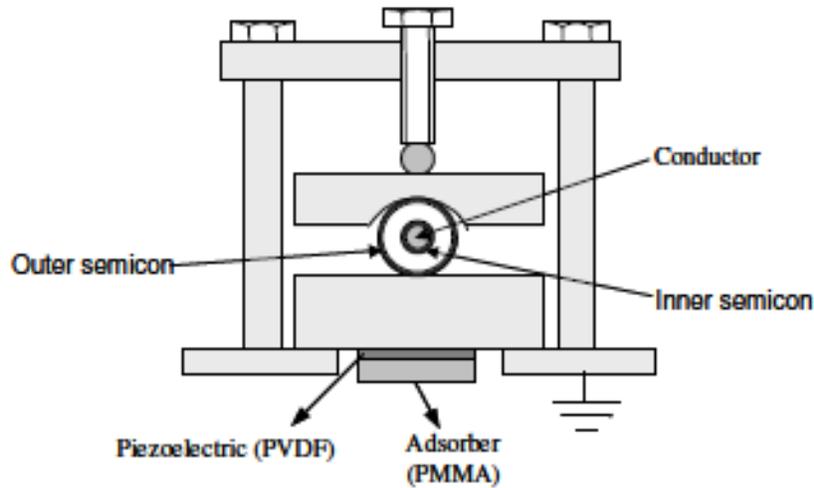


Figura 8.3
Sezione della cella PEA con il cavo adagiato.

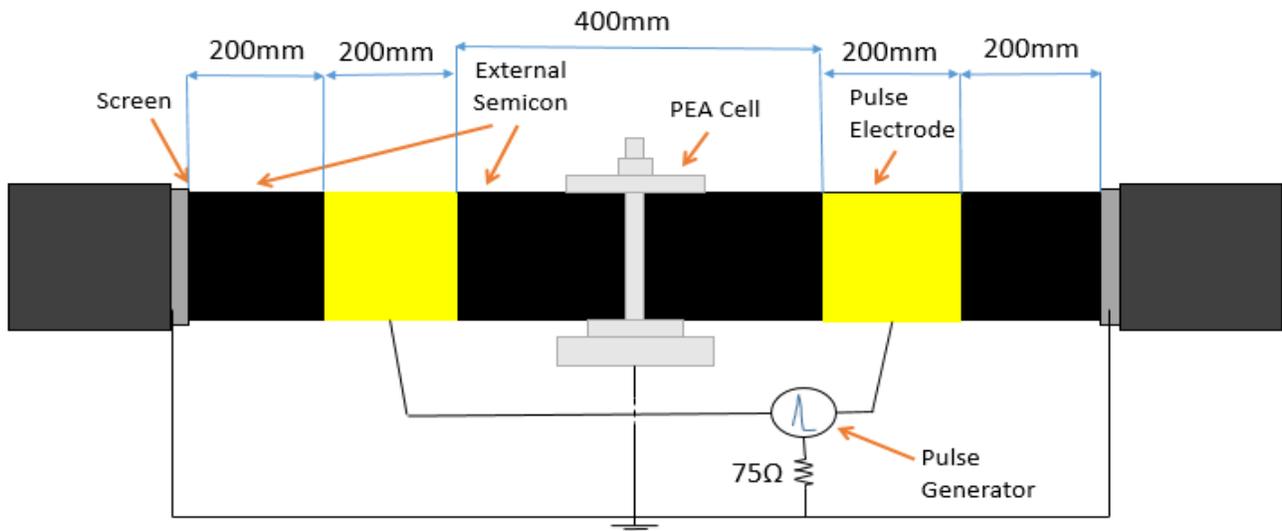


Figura 8.4
Configurazione del circuito PEA utilizzato per la misura sui cavi full size

Le specifiche del generatore d'impulso utilizzato per la misura sono:

- $V_P = 7000V$
- $\Delta T = 110ns$
- Risoluzione spaziale: $\eta = 70 \mu m$
- $SR_{oscilloscope} = 1 GS/s$

8.4 Misura preventiva

Prima di iniziare con la campagna di misure sono stati fatti dei test per valutare la forma d'onda e capire il tipo di segnale presente.

Le misure sono state eseguite con entrambe le polarità. In Figura 8.5 e Figura 8.6 è possibile distinguere diversi fenomeni. Il primo impulso (freccia rossa) è un disturbo attribuito a un rumore generato dal generatore di impulsi, questo arriva al trasduttore e, per il fenomeno delle riflessioni, appare nuovamente attenuato dopo $12\mu s$ (freccia gialla). La freccia verde indica invece l'impulso che è correlato all'elettrodo esterno. L'elettrodo di terra non è ambiguo, può essere provato eseguendo due test a polarità opposte e notando che la polarità di tale impulso si inverte (In Figura 8.5 il test è stato fatto in polarità positiva, mentre in Figura 8.6 in polarità negativa). La freccia blu indica invece la riflessione del picco associato all'elettrodo di terra.

Si consideri lo spessore dell'isolante un valore ξ , calcoli e simulazioni hanno portato a dire che il secondo picco, cioè quello relativo al conduttore, dovesse essere graficato con un ritardo δ rispetto al primo picco. Facendo una considerazione sul segnale acquisito si ottiene che il picco dell'elettrodo al potenziale cade in un intorno della prima riflessione del disturbo del generatore d'impulso. Questo rende praticamente impossibile il rilevamento del picco associato al conduttore.

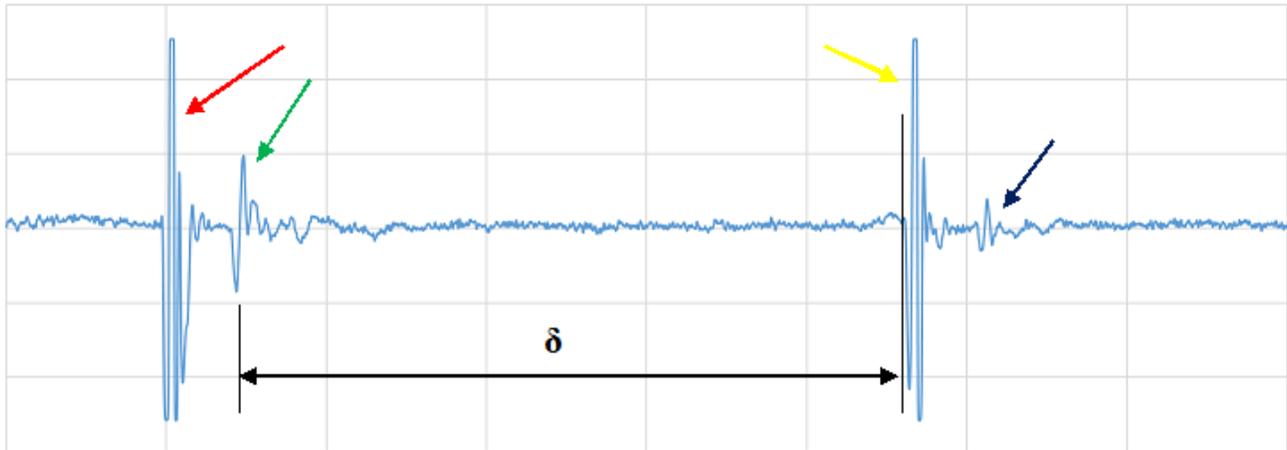


Figura 8.5
mV – N° punti
Pattern della misura PEA preventiva sul cavo del progetto IFA2, tensione di prova $+U_0$.

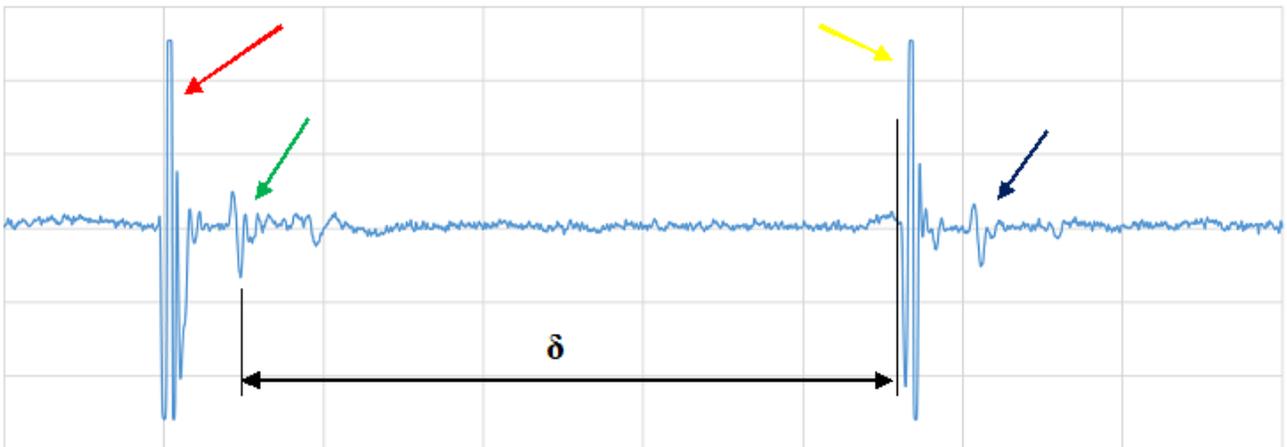


Figura 8.6
mV – N° punti
Pattern della misura PEA preventiva sul cavo del progetto IFA2, tensione di prova $-U_0$.

L'impossibilità di acquisire il secondo picco non è tuttavia legata al solo disturbo della riflessione dell'impulso del generatore, infatti vi è un problema di fondo dettato dall'attenuazione del segnale.

Nelle prove nel Capitolo 6 si è visto che il picco interno può avere anche un'ampiezza di circa il 30% dell'ampiezza dell'elettrodo esterno; nei cavi full size si ha uno spessore dell'isolante maggiore rispetto a quello dei cavi modello, quindi è logico attendersi un'attenuazione ancor più evidente dell'onda di pressione. Questo effetto porta ad avere un picco interno con un valore prossimo a quello dei disturbi del segnale, rendendo quindi impossibile la rilevazione dello stesso picco.

La riflessione del disturbo e l'attenuazione del segnale rendono impossibile individuare il picco relativo all'elettrodo interno. L'assenza di questo dato implica anche l'impossibilità di elaborazione dei pattern in quanto il programma ha bisogno delle distribuzioni di carica su entrambe le interfacce per poter procedere.

Inoltre si noti la quantità e il valore dei disturbi. Un pattern così distorto è difficilmente elaborabile anche con la presenza del secondo picco, questo perché si rischierebbe di considerare i disturbi come distribuzione di carica andando a ipotizzare distorsioni del campo non reali.

8.5 La campagna di misure PEA

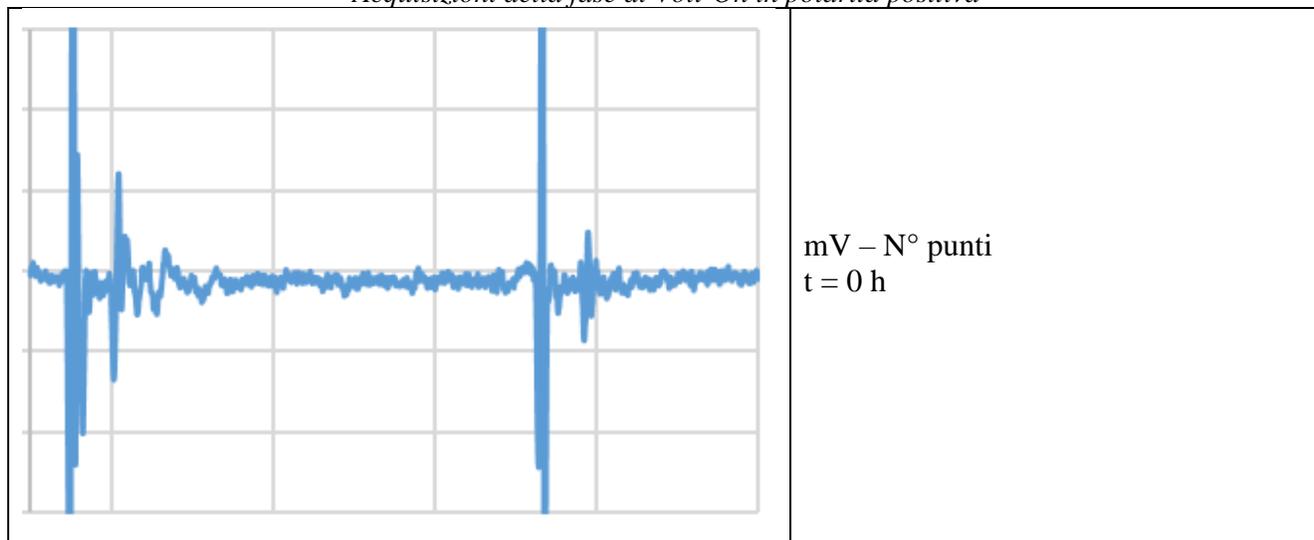
Come detto le misure PEA sono state fatte seguendo il procedimento elencato nel paragrafo 8.2, essendo la misura preventiva molto disturbata, quindi non utilizzabile ai fini di elaborazione e calcolo del campo elettrico, si è deciso in accordo col cliente di svolgere prove di volt-on tutte da 3 ore.

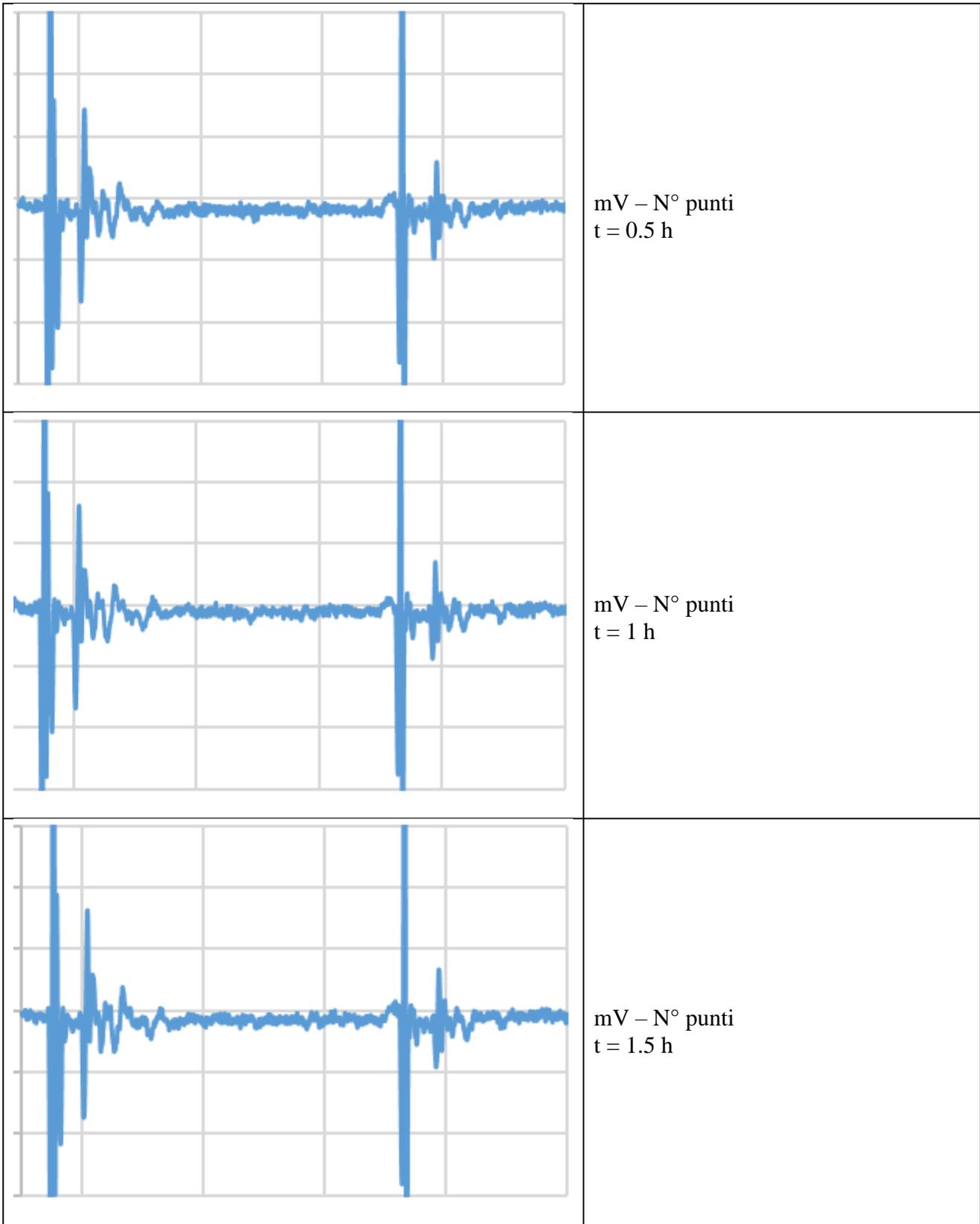
I grafici che verranno in seguito riportati sono privi di valori sugli assi (come spiegato), tuttavia è da specificare che l'asse delle ascisse corrisponde al numero di punti dell'acquisizione, mentre quello delle ordinate è il valore in mV fornito dal trasduttore piezoelettrico.

8.5.1 Misure PEA sul cavo1

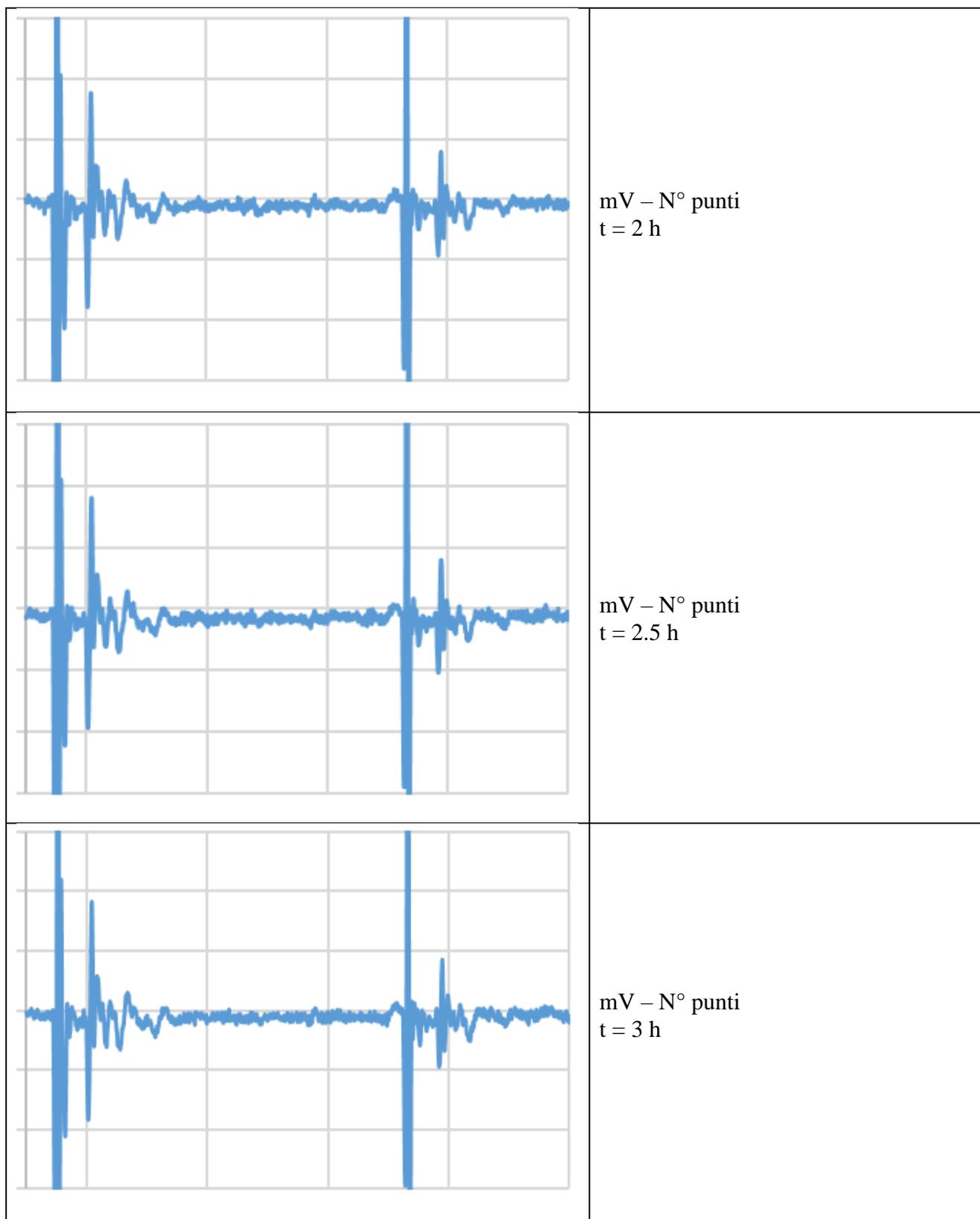
Nelle Tabelle viene mostrata l'evoluzione temporale del segnale acquisito per i vari test svolti sui cavi del progetto.

Tabella 8.1
Acquisizioni della fase di Volt-On in polarità positiva





8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2



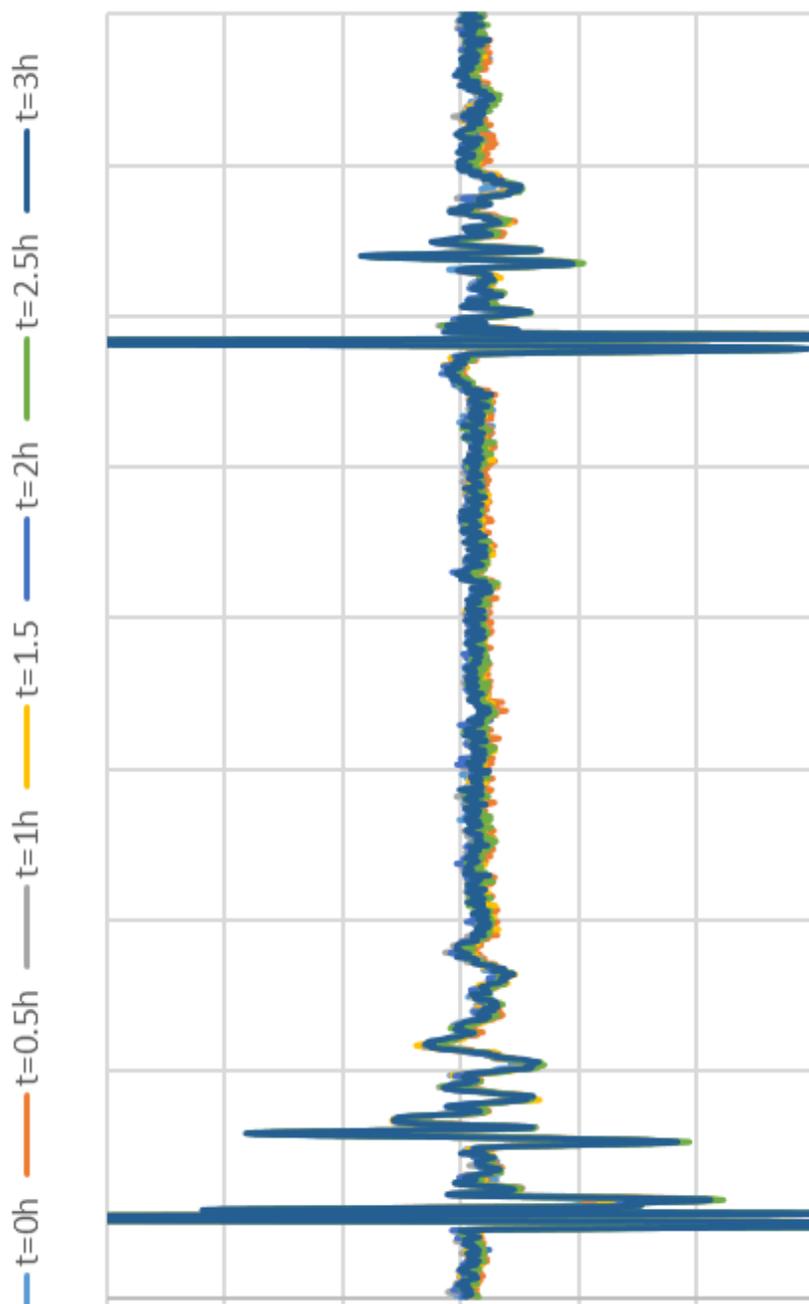


Figura 8.7
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-on positiva del cavo1.

Poiché l'elaborazione del segnale non può dare un buon risultato, può essere fatta solo una valutazione qualitativa. La parte centrale del segnale non ha un'elevata distorsione con l'evoluzione del tempo; per questo motivo si può affermare che se effettivamente si forma una distribuzione di carica

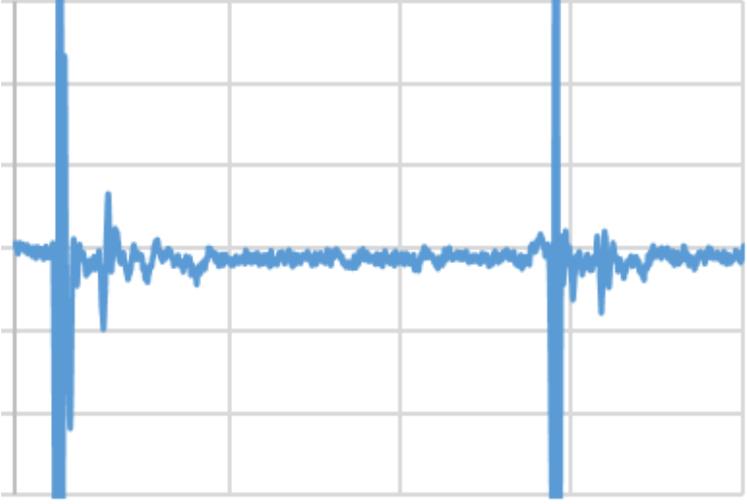
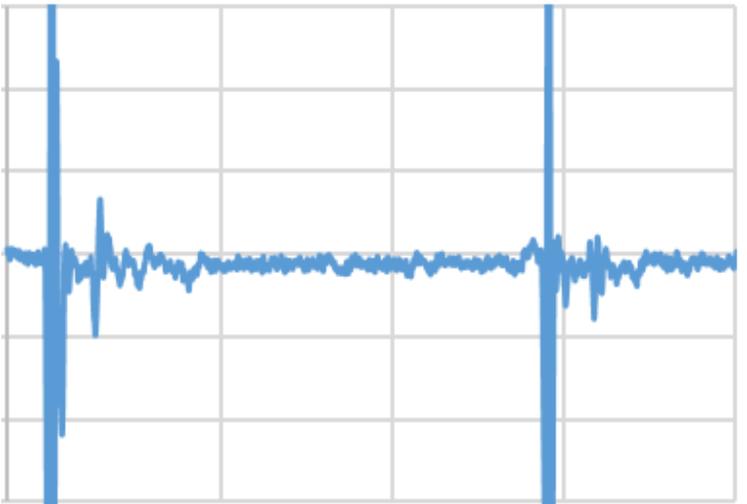
8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2

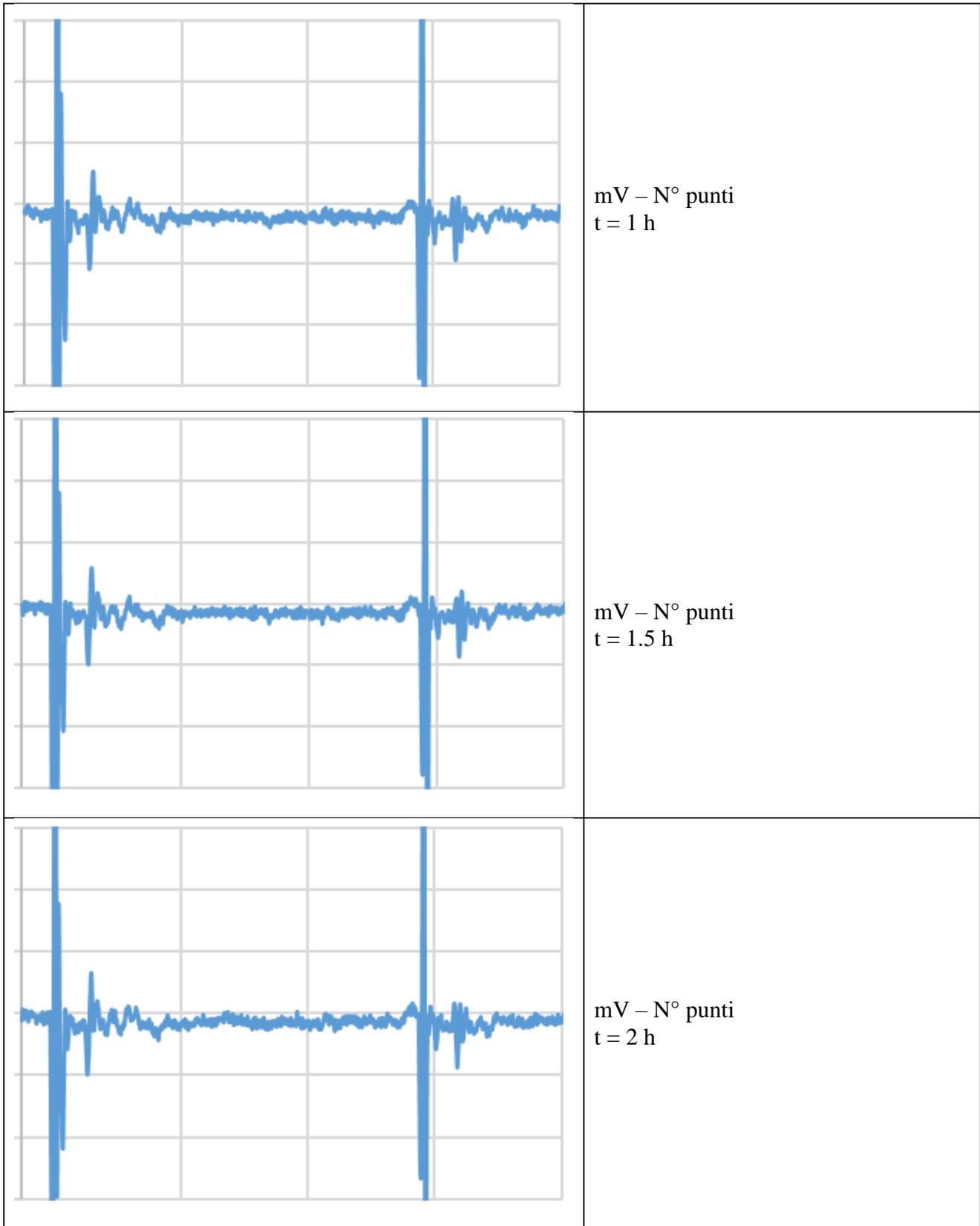
nello strato isolante questa non è così evidente da essere rilevata, quindi ha senso pensare che il campo elettrico possa subire una distorsione, ma di modesta entità.

Finita la fase di volt-on il cavo è stato messo a terra come richiesto dalla procedura e si è iniziata la misura di volt-off.

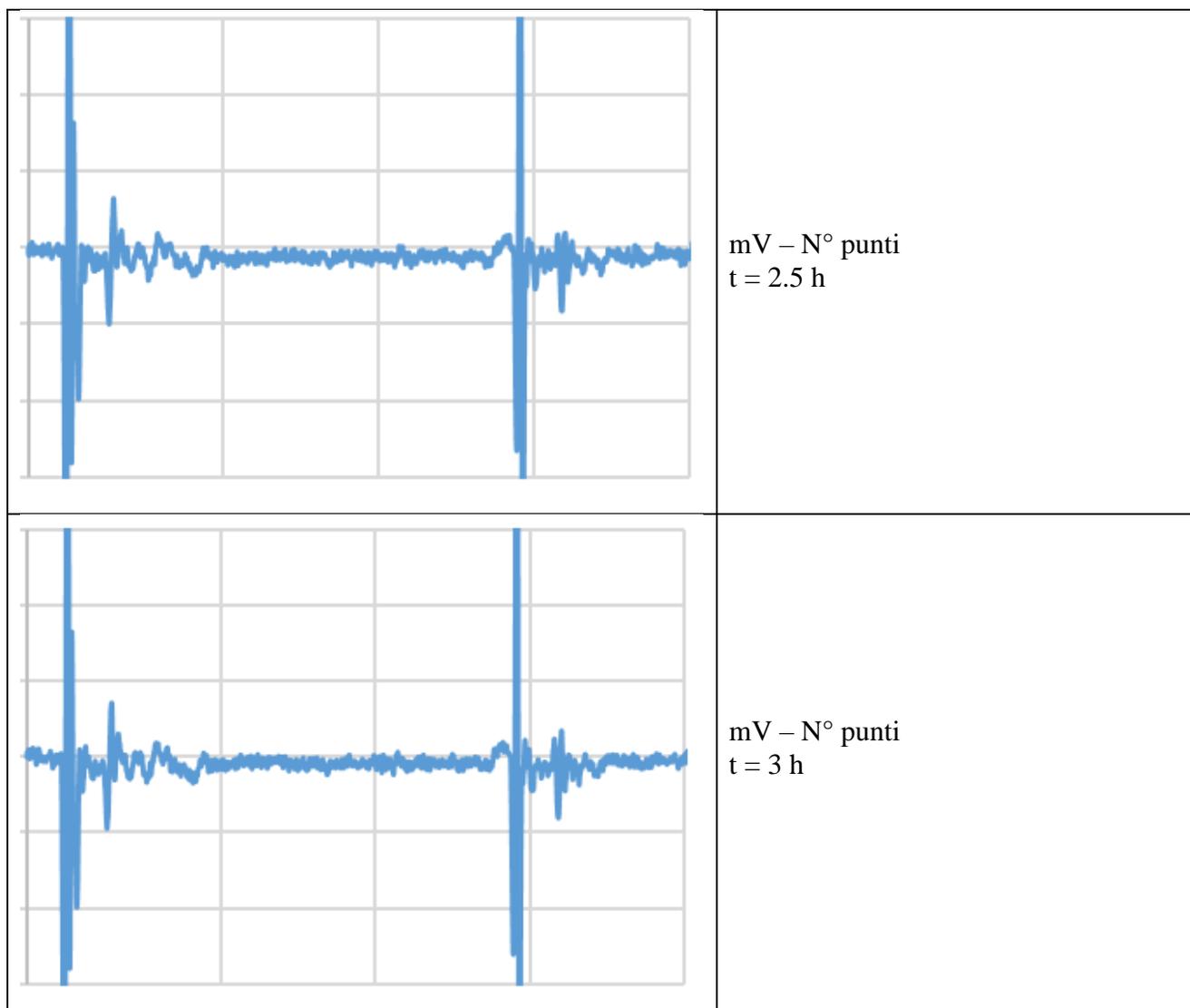
Tabella 8.2

Acquisizioni della fase di Volt-Off in polarità positiva

	mV – N° punti t = 0 h
	mV – N° punti t = 0.5 h



8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2



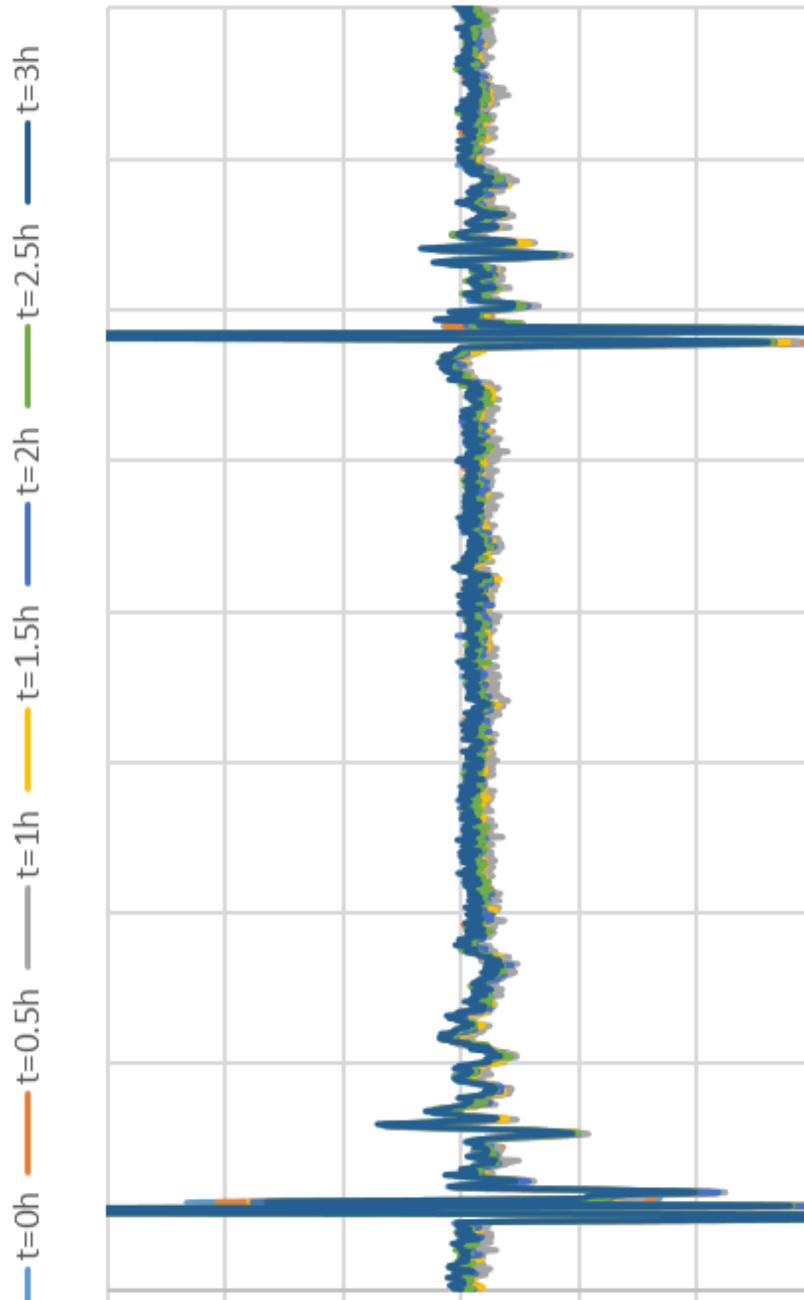
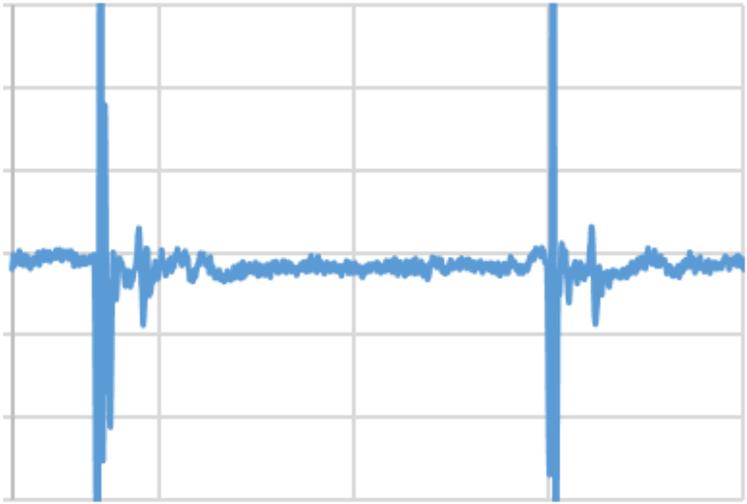
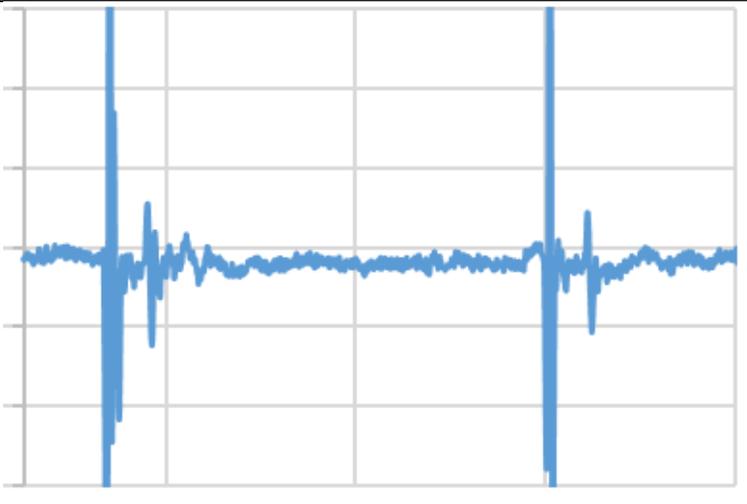
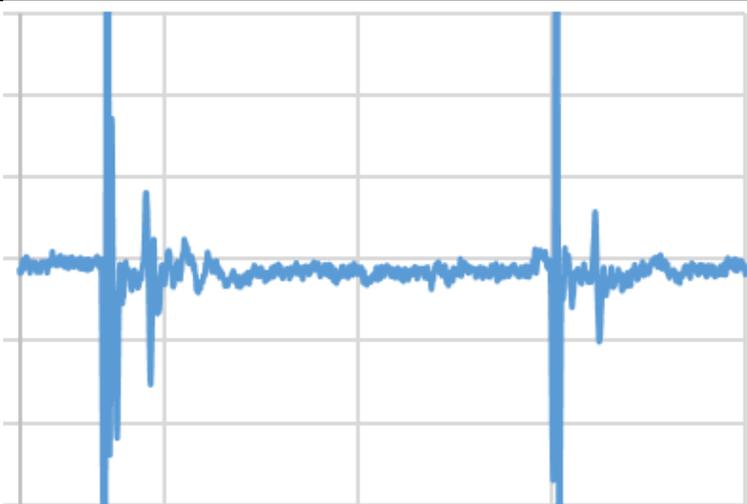
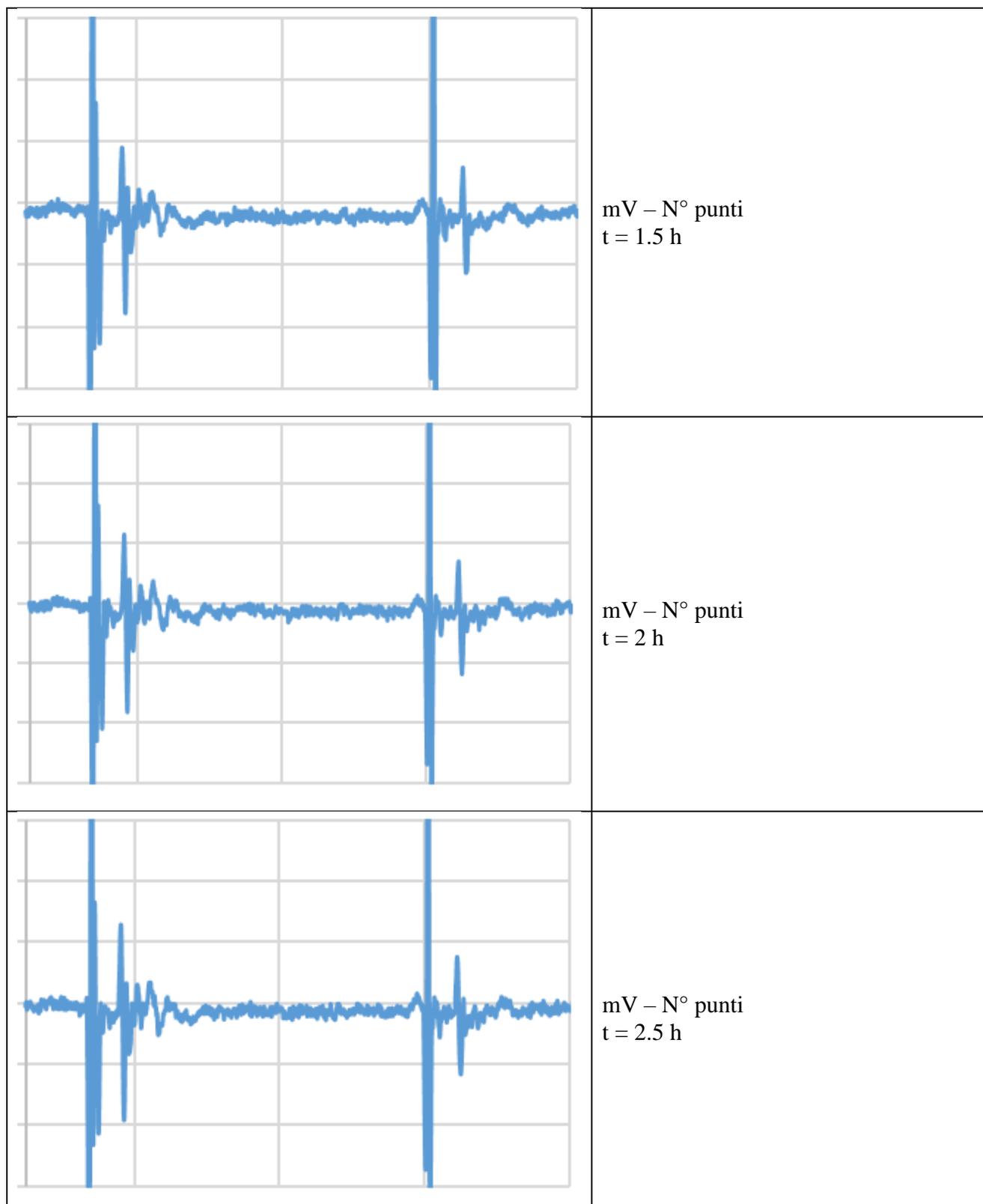


Figura 8.8
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-off positiva del cavo1.

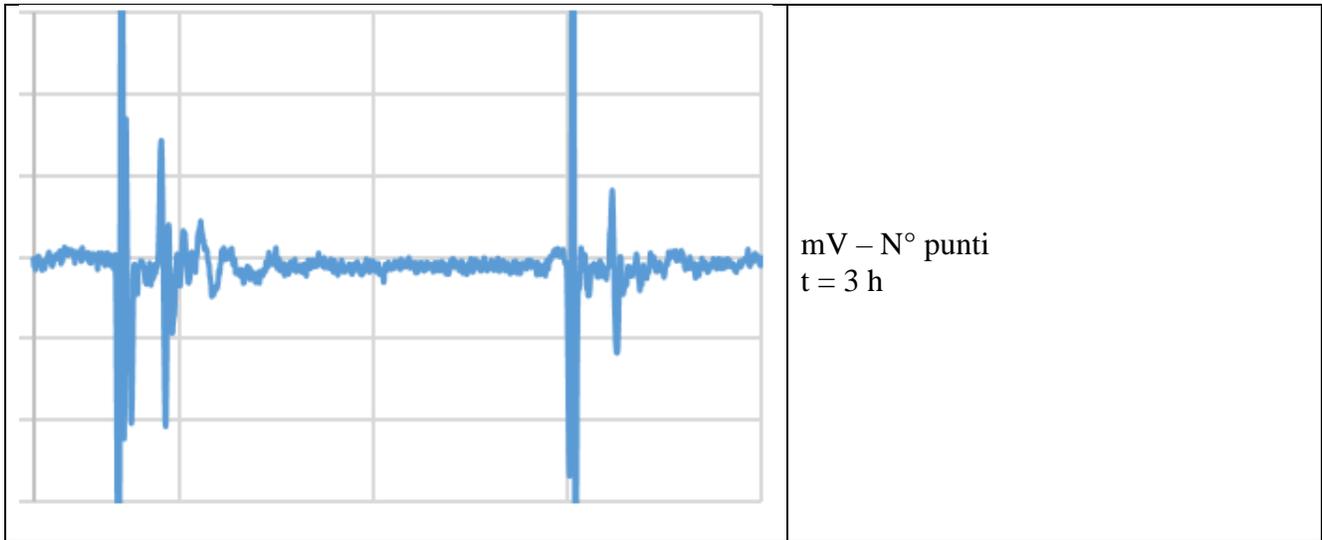
Dopo 24 ore di periodo di riposo si è applicata tensione negativa al cavo ed è stata fatta la prova di volt-on in polarità negativa.

Tabella 8.3
Acquisizioni della fase di Volt-On in polarità negativa

 A PEA signal waveform on a grid. The signal shows a noisy baseline with two prominent, sharp negative-going spikes. The first spike is on the left side of the grid, and the second is on the right side. The baseline is relatively flat between the spikes.	<p>mV – N° punti t = 0 h</p>
 A PEA signal waveform on a grid, similar to the first one. It shows two sharp negative-going spikes on a noisy baseline. The spikes are slightly more pronounced than in the first plot.	<p>mV – N° punti t = 0.5 h</p>
 A PEA signal waveform on a grid, similar to the previous ones. It shows two sharp negative-going spikes on a noisy baseline. The spikes are very similar in appearance to those in the previous plots.	<p>mV – N° punti t = 1 h</p>



8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2



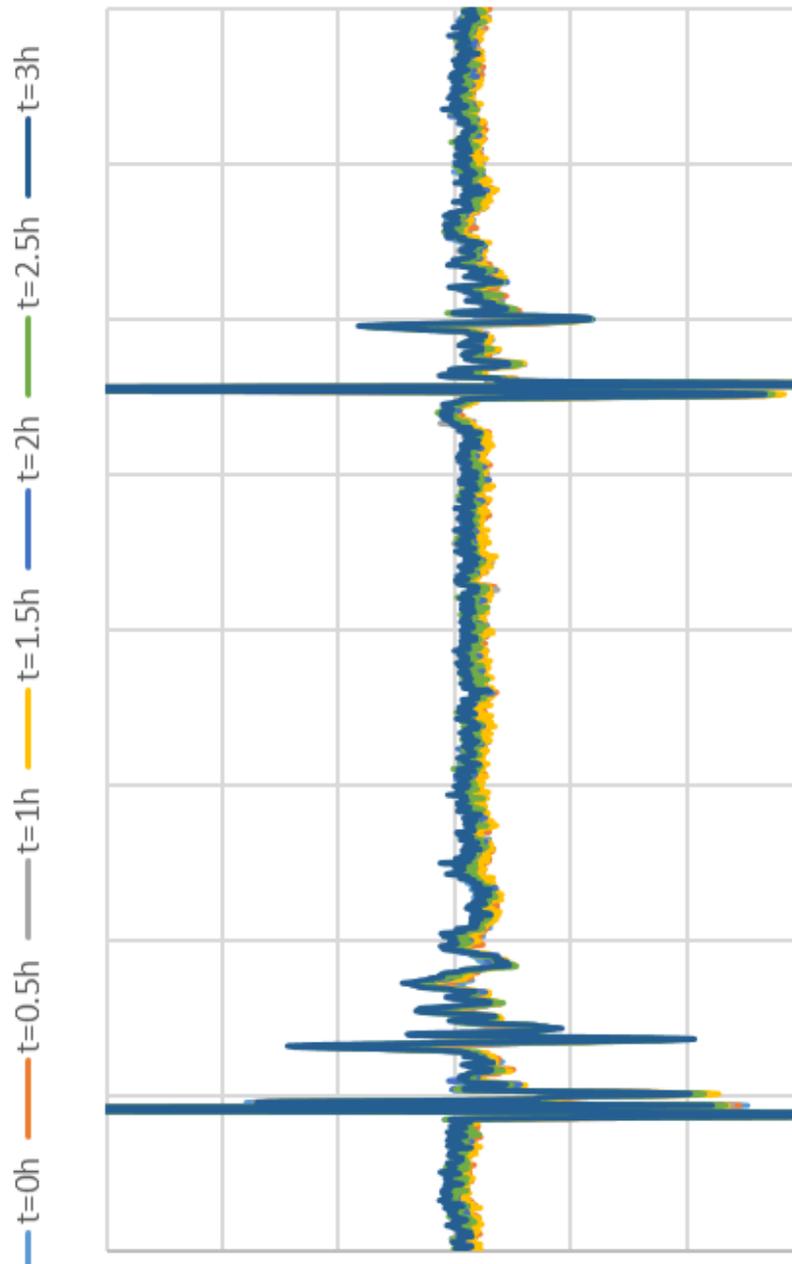
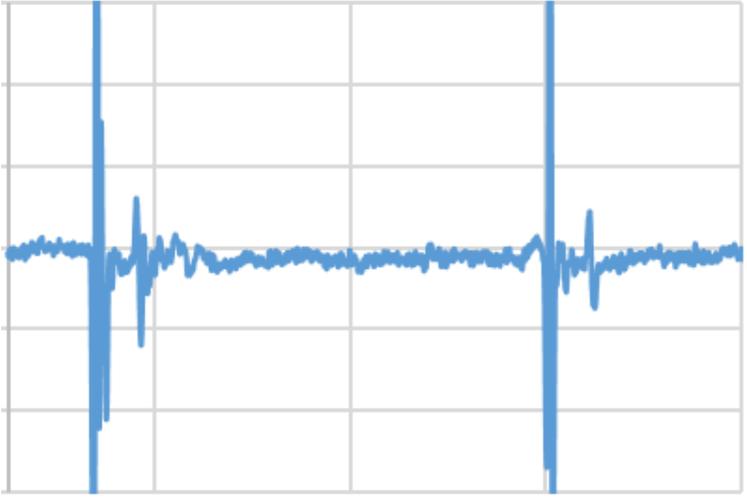
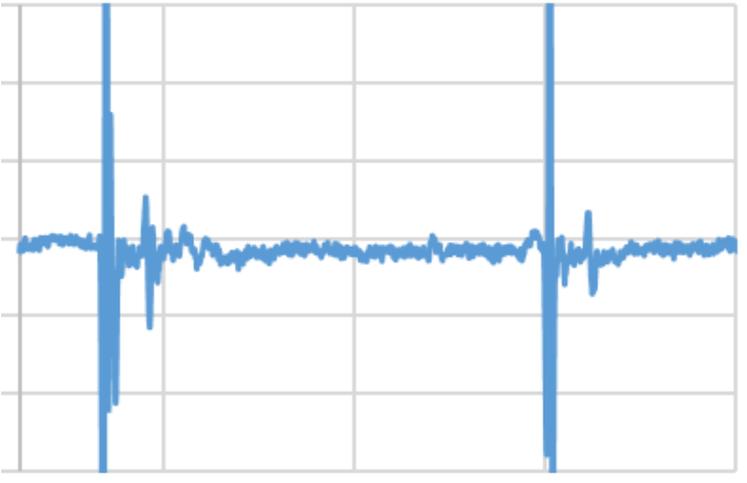
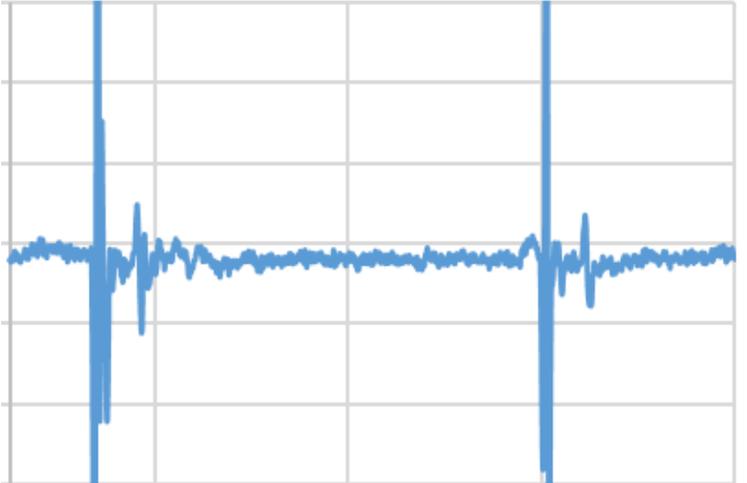
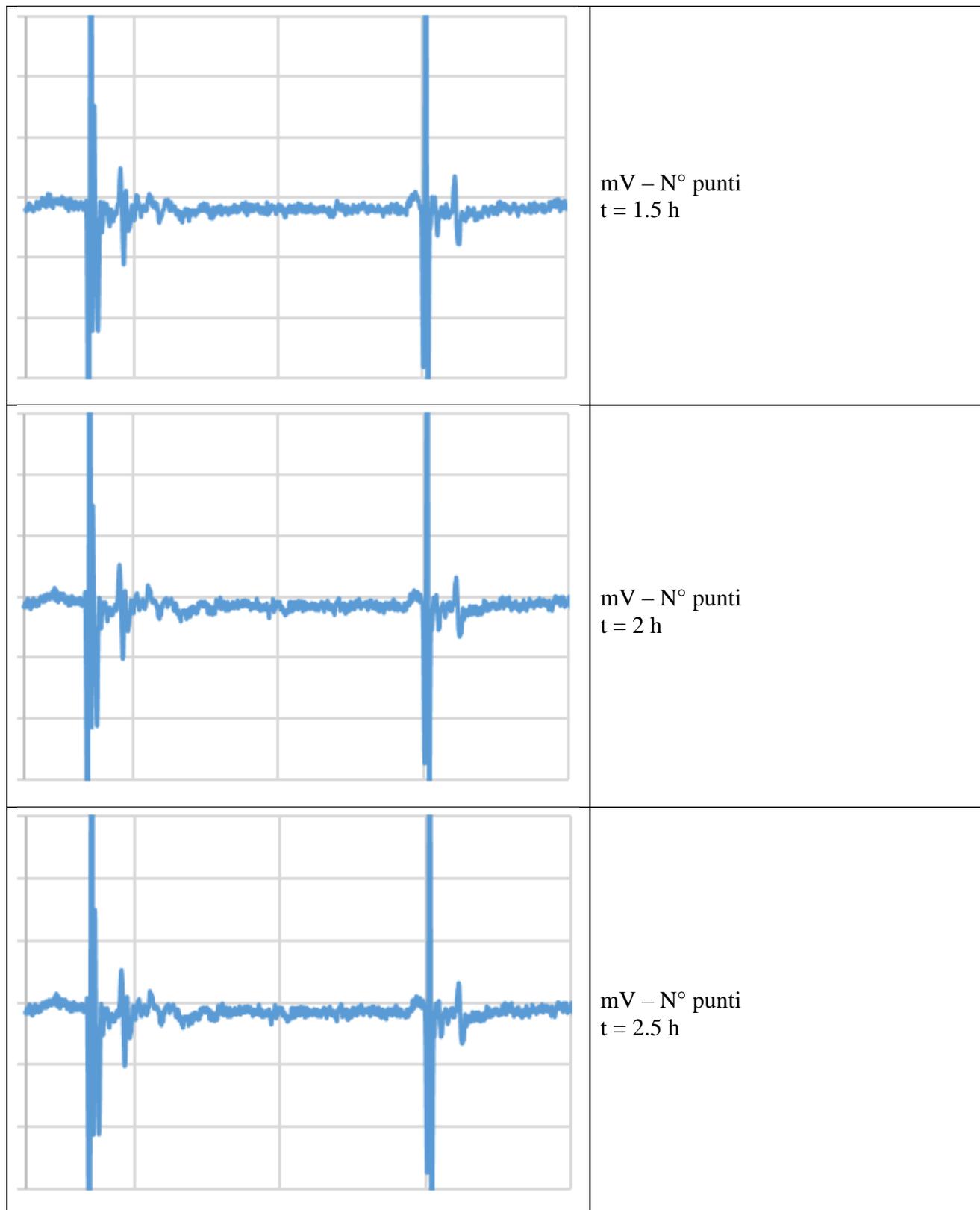


Figura 8.9
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-on negativa del cavo1.

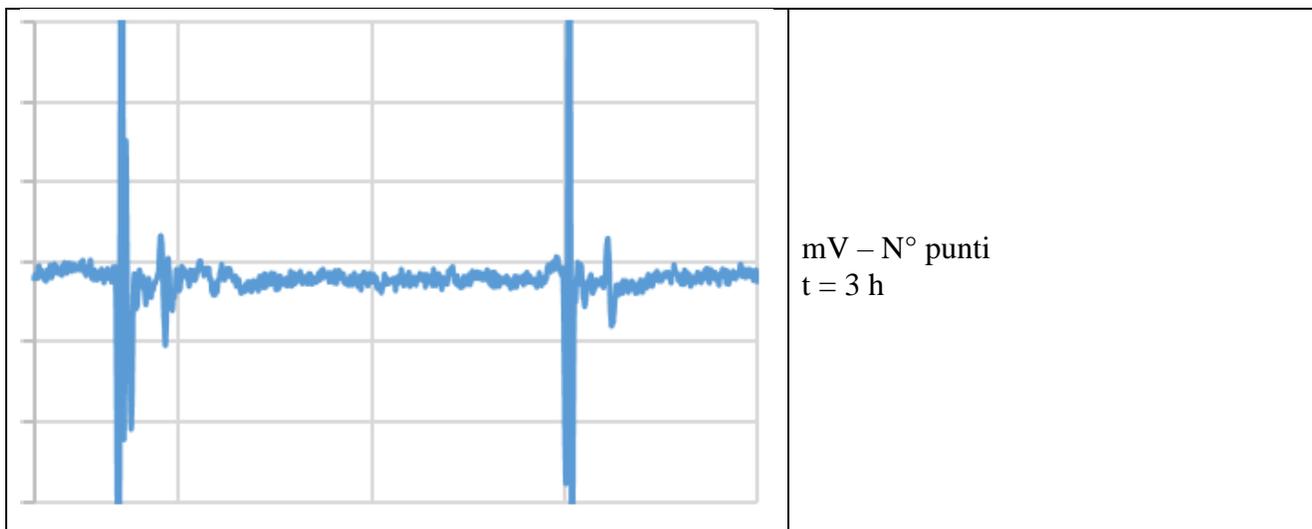
Ancora una volta, come il caso di polarità positiva, viene messo a terra il cavo e fatta la misura in volt-off.

Tabella 8.4
Acquisizioni della fase di Volt-Off in polarità negativa

	<p>mV – N° punti t = 0 h</p>
	<p>mV – N° punti t = 0.5 h</p>
	<p>mV – N° punti t = 1 h</p>



8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2



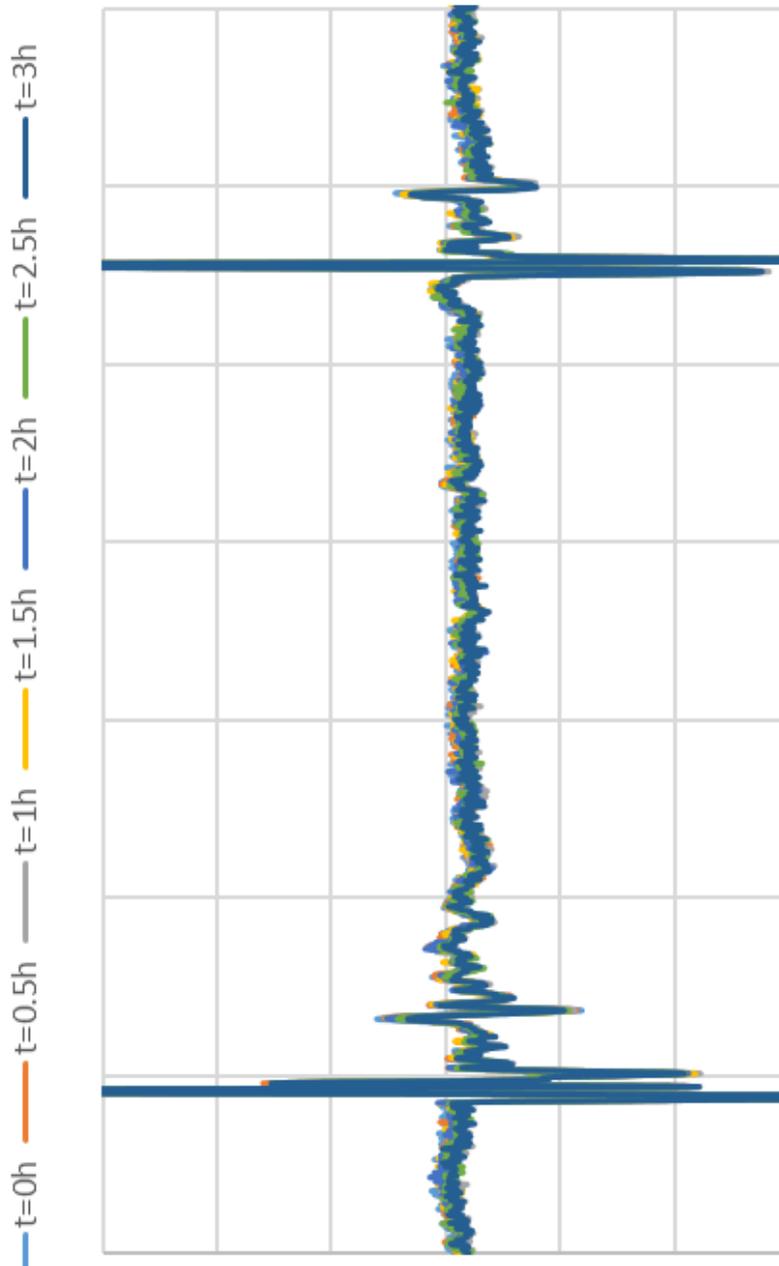


Figura 8.10
mV – N° punti
 Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-off negativa del cavo1.

Al termine di queste acquisizioni si è conclusa la misura PEA sul cavo1. Le considerazioni che possono essere fatte alla fine di questo test sono le medesime fatte dopo la prova di polarizzazione positiva: la parte centrale del segnale non ha un'elevata distorsione con l'evoluzione del tempo; per questo motivo si può affermare che se effettivamente si forma una distribuzione di carica nello strato

isolante questa non è così evidente da essere rilevata; quindi ha senso pensare che, se vi è una distorsione di campo elettrico, questa sarà di entità ridotta.

8.5.2 Misure PEA sul cavo2 e cavo3

Mentre il cavo1 costituiva un circuito unico, il cavo2 e il cavo3 appartengono al medesimo circuito. Nel secondo caso il circuito è molto più lungo del primo e annovera la presenza di diversi giunti.

In Figura 8.11 è rappresentato il circuito testato e nel quale si sono fatte le misure di carica spaziale. Il sistema di misura PEA è stato posizionato nelle zone evidenziate di rosso.

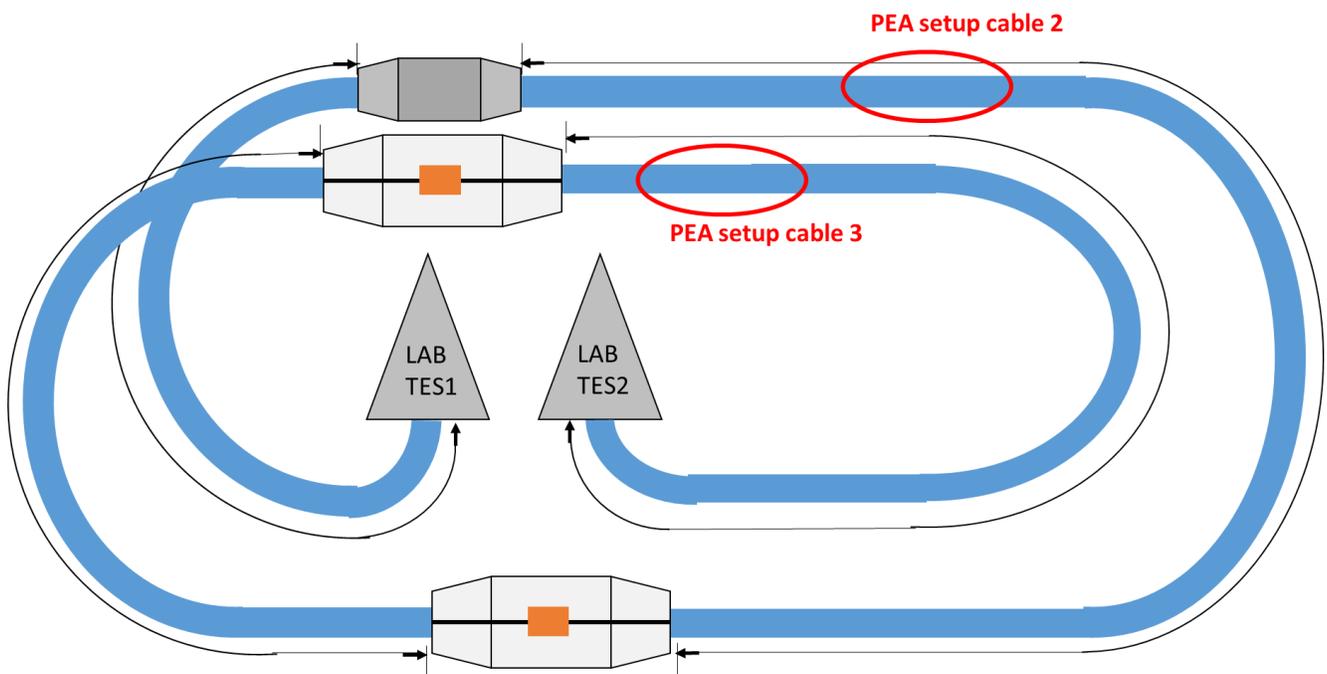


Figura 8.11
Circuito di prova del cavo2 e del cavo3.

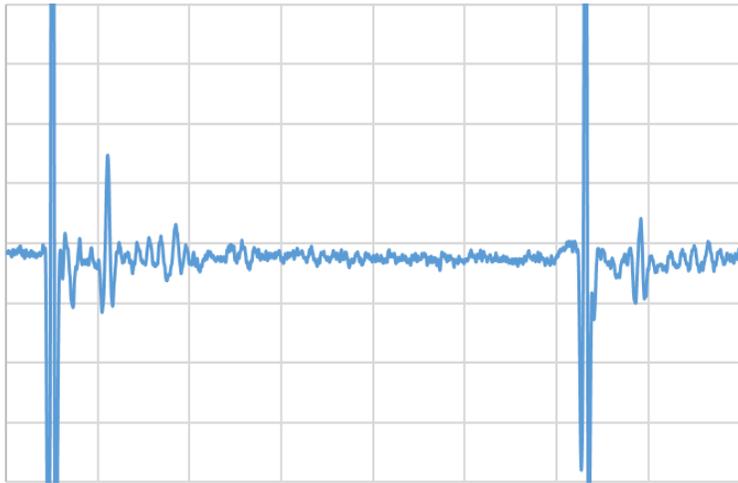
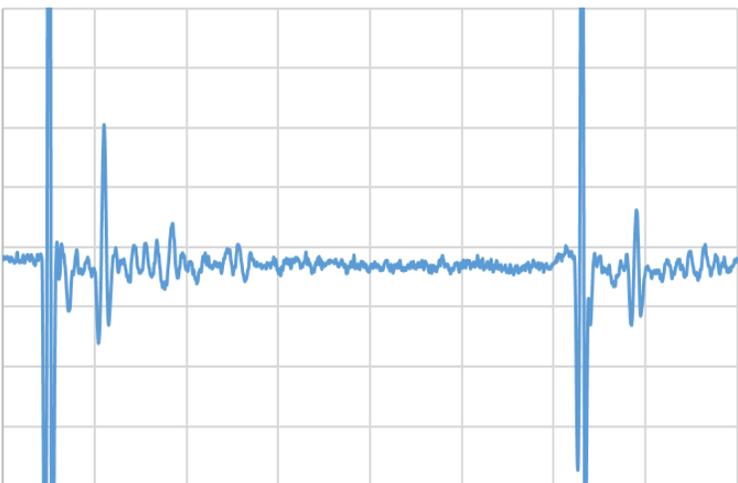
Il setup utilizzato per fare la misura è quello rappresentato in Figura 8.4.

Nonostante i tre cavi siano ovviamente diversi fra loro, lo spessore dello strato isolante rimane il medesimo, quindi il problema dell'impossibilità di rilevare il secondo picco, come si vedrà, è comune a tutti i test.

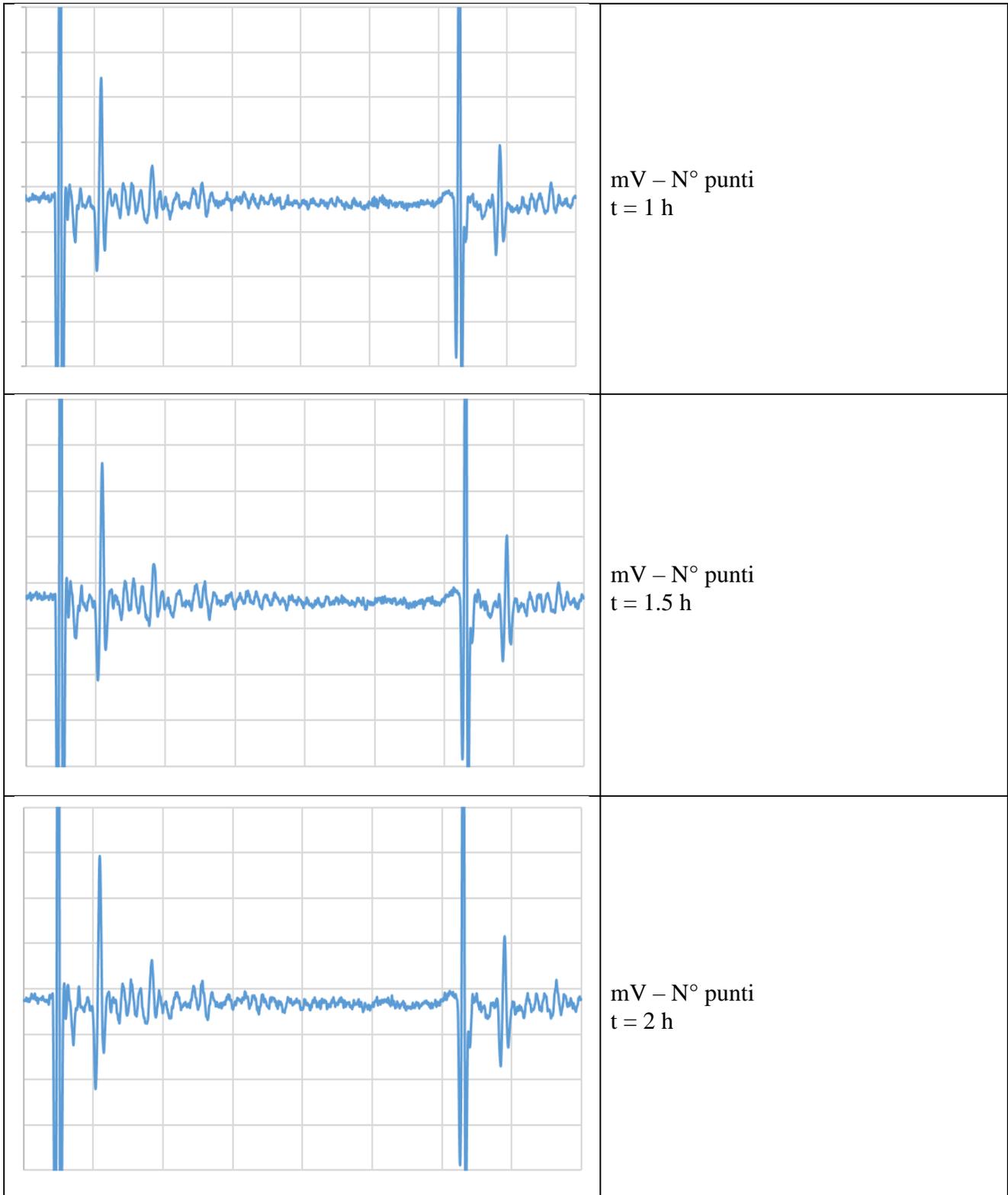
Nelle Tabelle viene mostrata l'evoluzione temporale del segnale acquisito per i vari test svolti sul cavo2 del progetto.

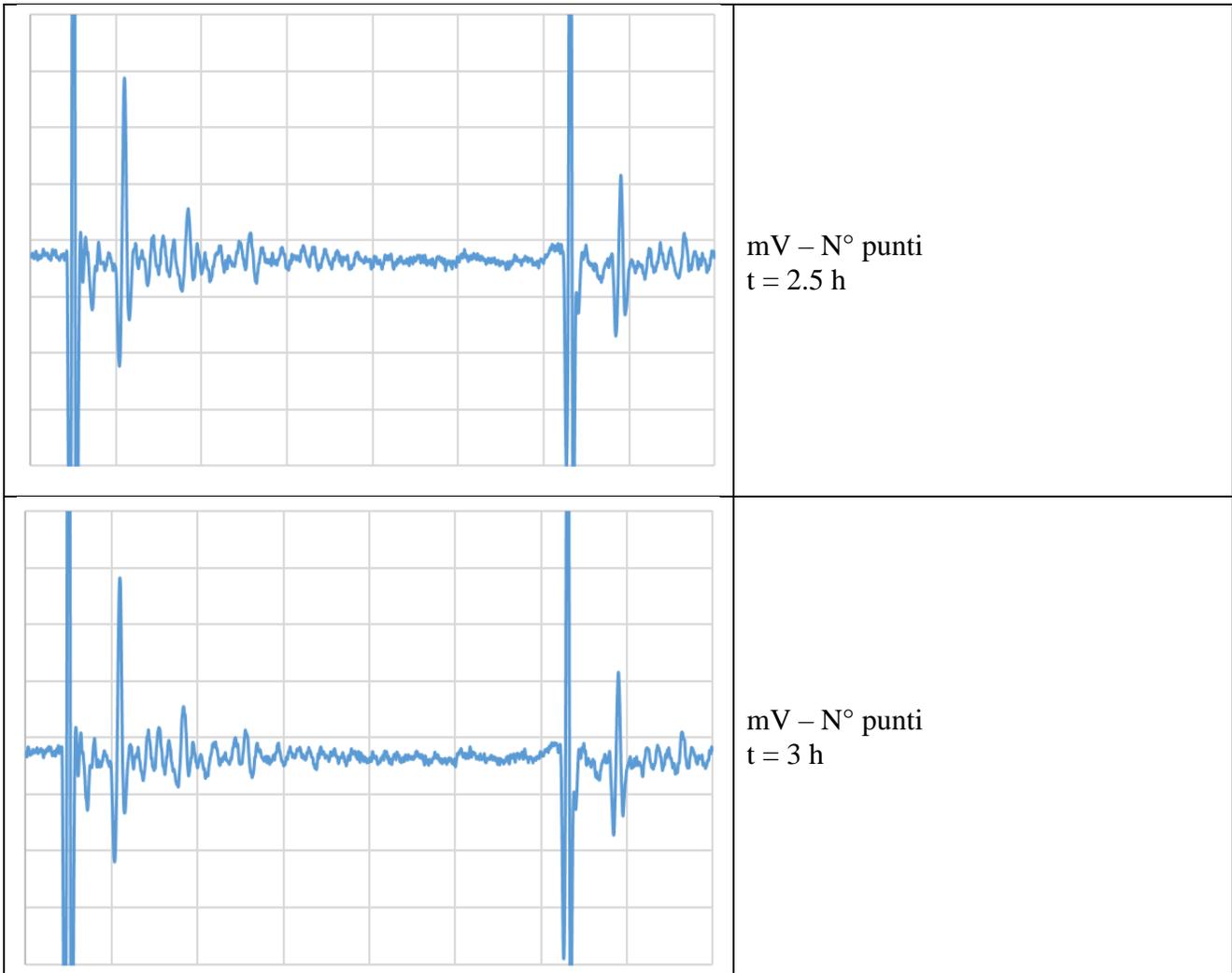
Tabella 8.5

Acquisizioni della fase di Volt-On in polarità positiva

	<p>mV – N° punti t = 0 h</p>
	<p>mV – N° punti t = 0.5 h</p>

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2





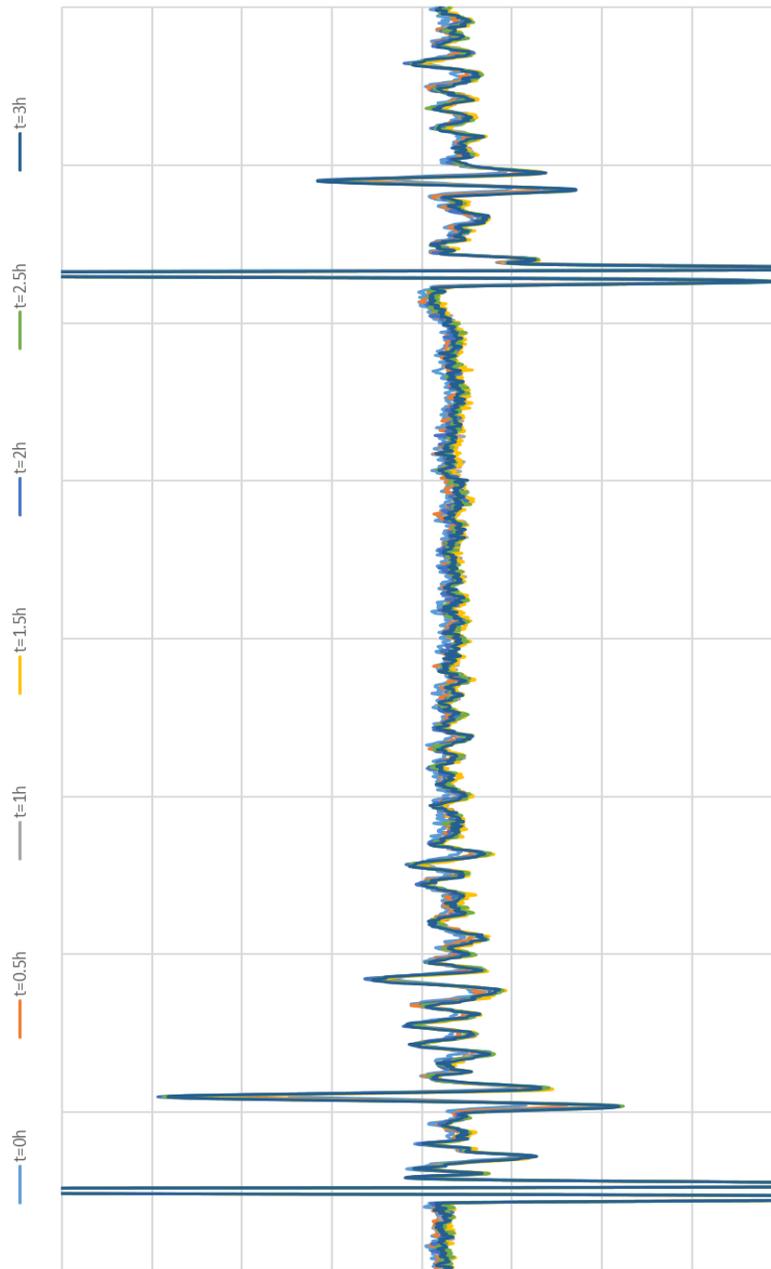


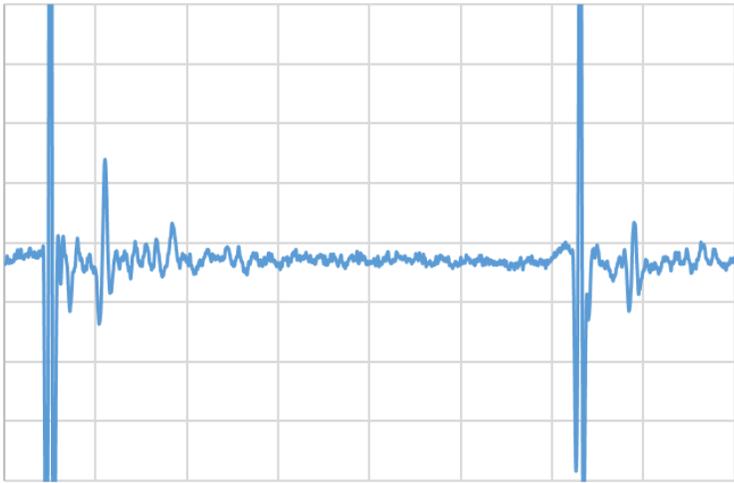
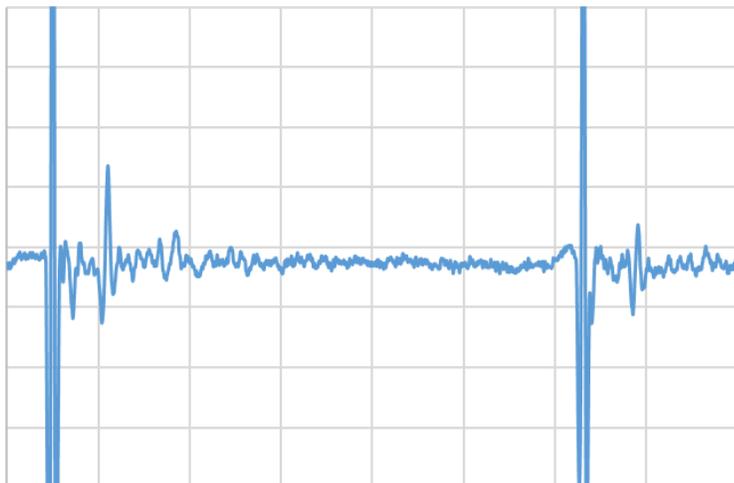
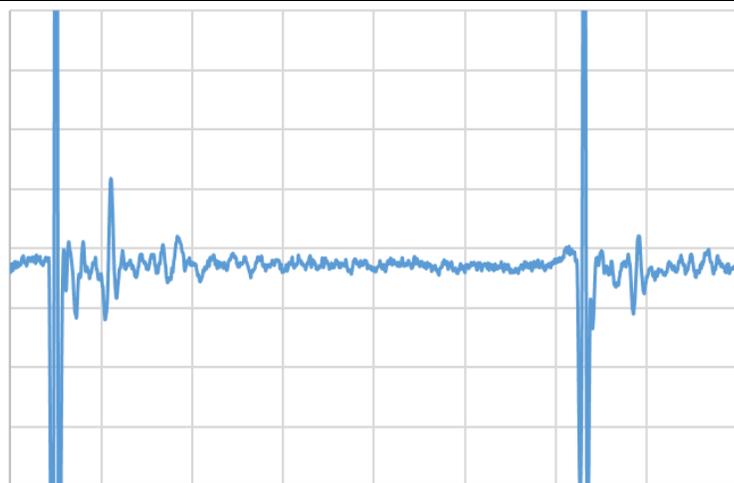
Figura 8.12
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-on positiva del cavo2.

Quello che si nota sin da subito è che il picco relativo all'elettrodo esterno ha un aumento evidente nel tempo. Questo fenomeno è dato dalla carica del cavo; in questo circuito si hanno in gioco lunghezze dei cavi maggiori rispetto al caso del cavo1, quindi la capacità equivalente del cavo è maggiore e richiede più tempo per essere caricata.

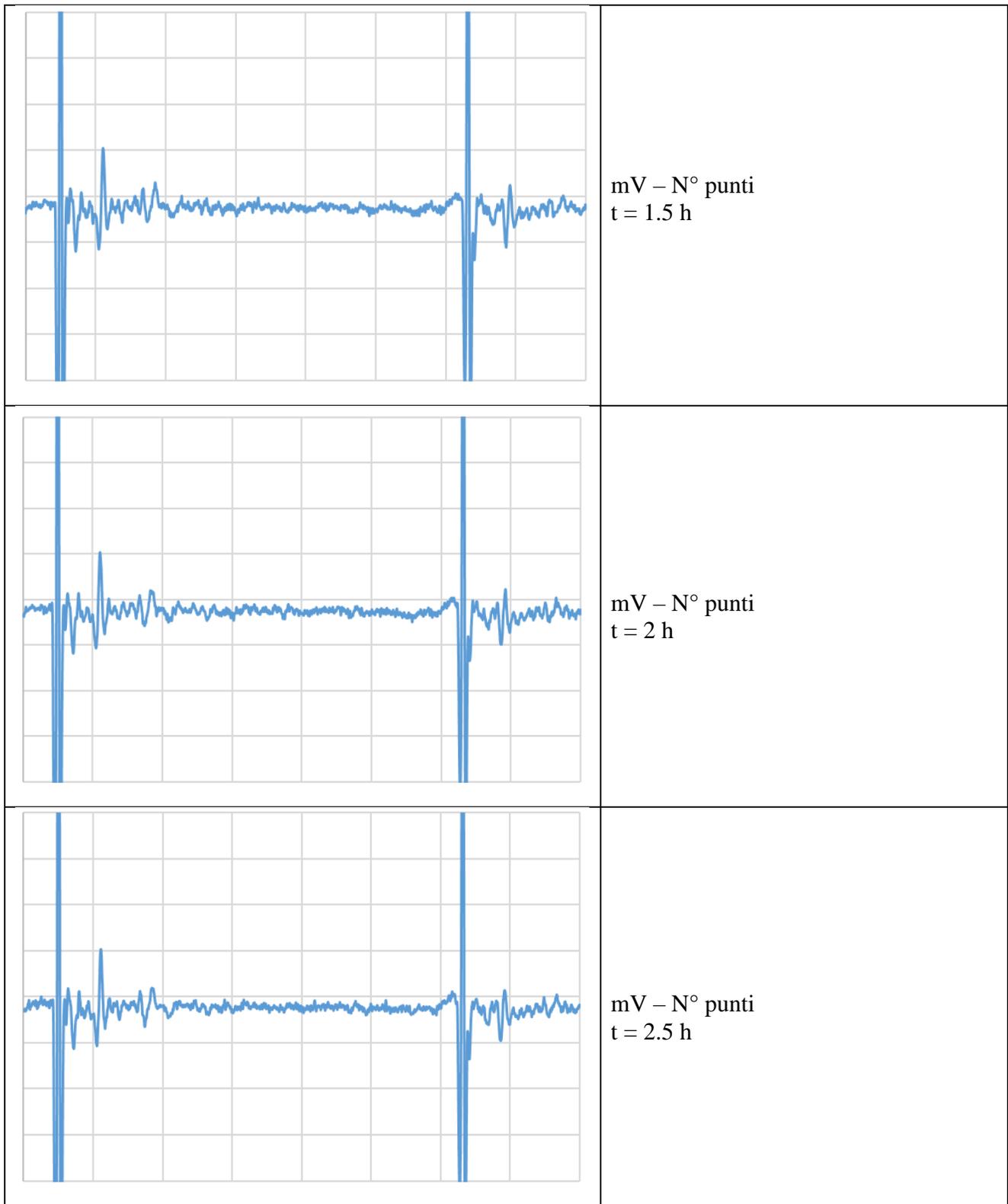
Finita la prova di polarizzazione si mette a terra il conduttore e si procede con la misura di volt.off.

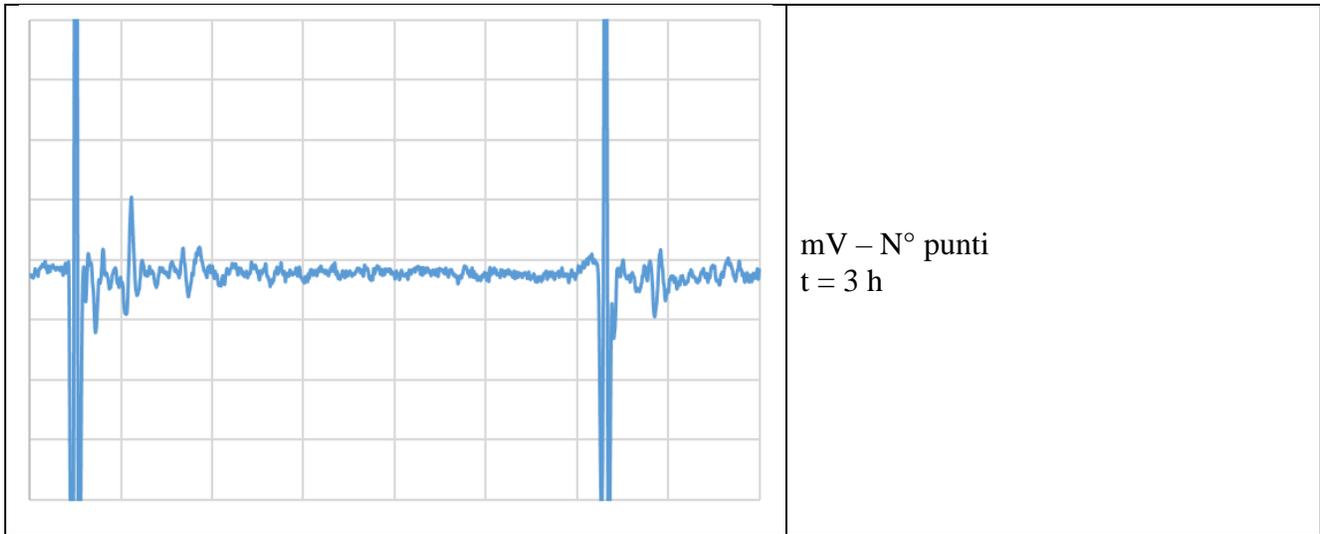
Tabella 8.6

Acquisizioni della fase di Volt-Off in polarità positiva

	<p>mV – N° punti t = 0 h</p>
	<p>mV – N° punti t = 0.5 h</p>
	<p>mV – N° punti t = 1 h</p>

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2





Anche nella fase di volt-off si può notare l'impatto della capacità del cavo. Si ha infatti una riduzione graduale e costante del picco associato all'elettrodo esterno.

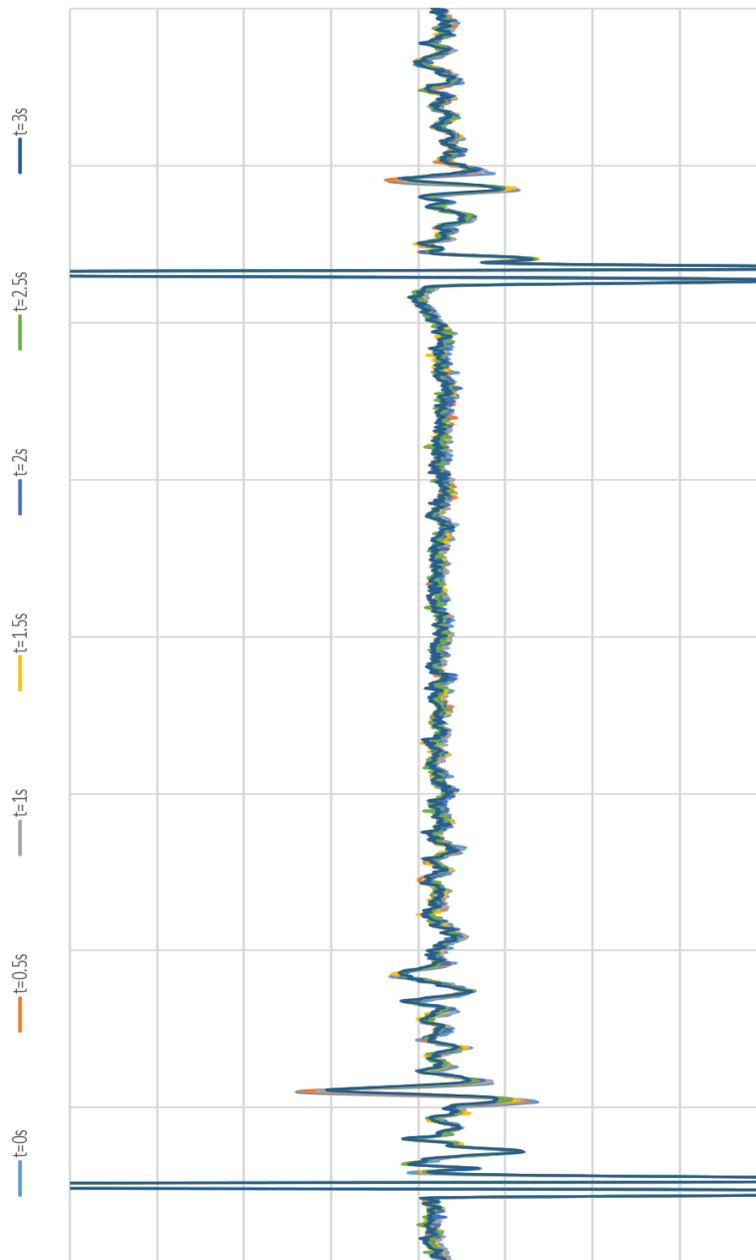
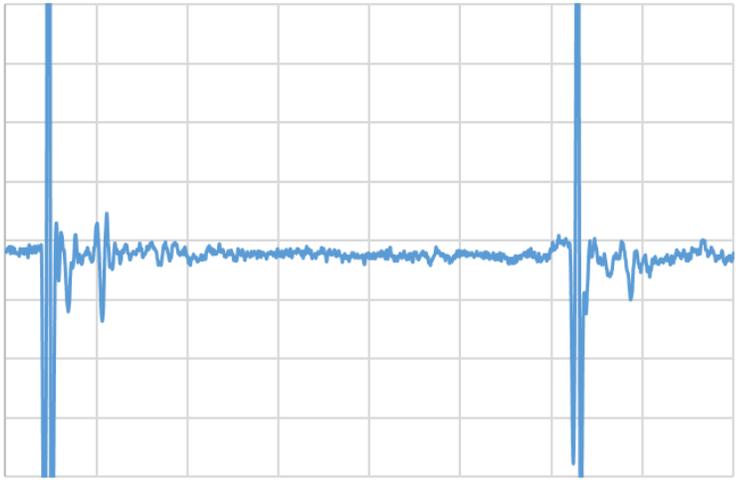
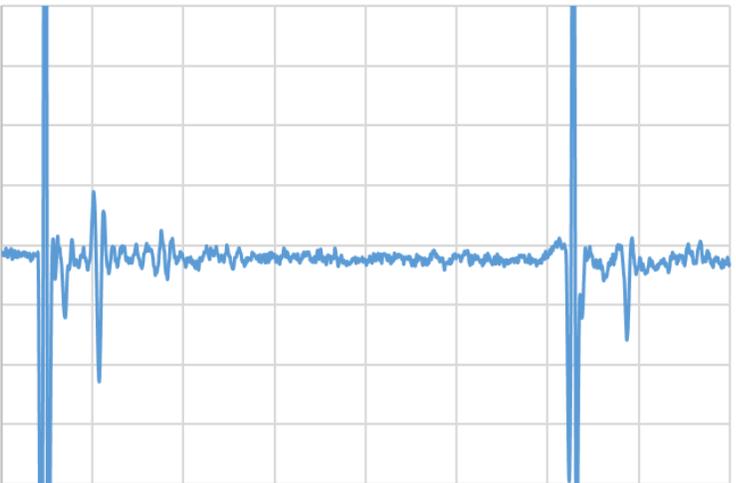
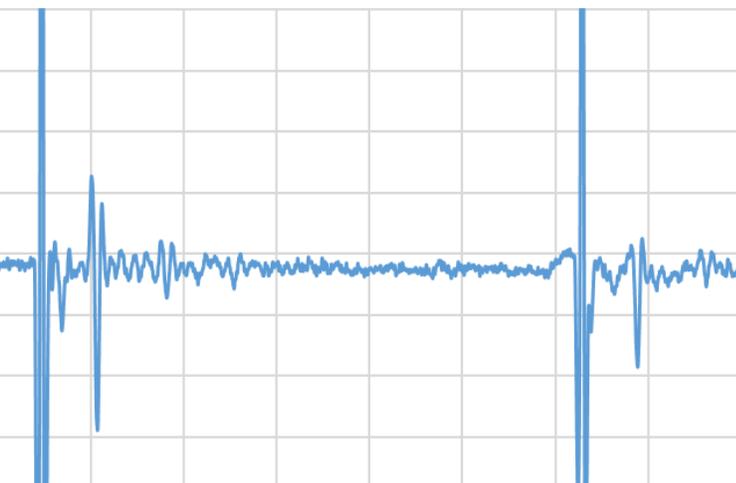


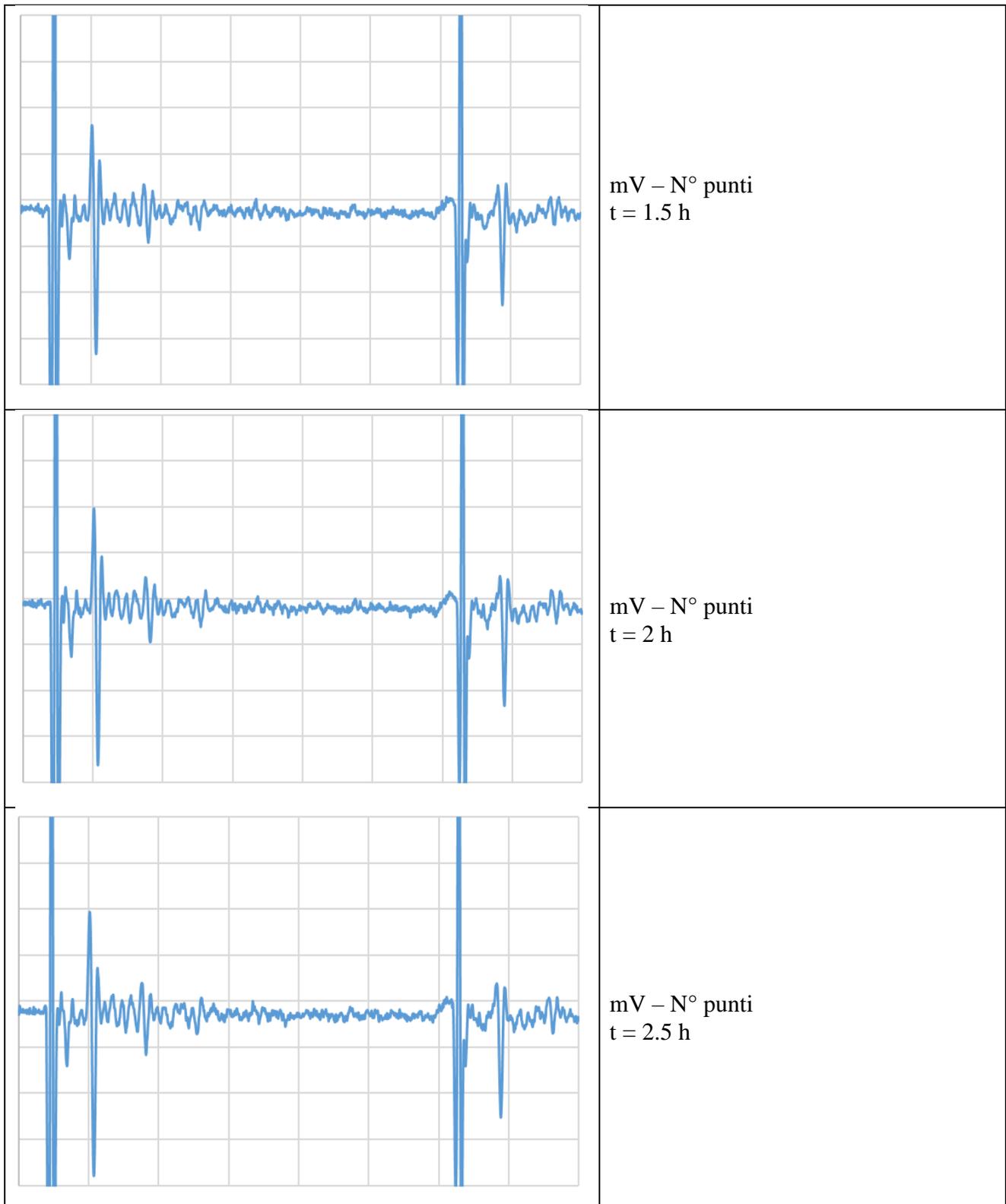
Figura 8.13
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-off positiva del cavo2.

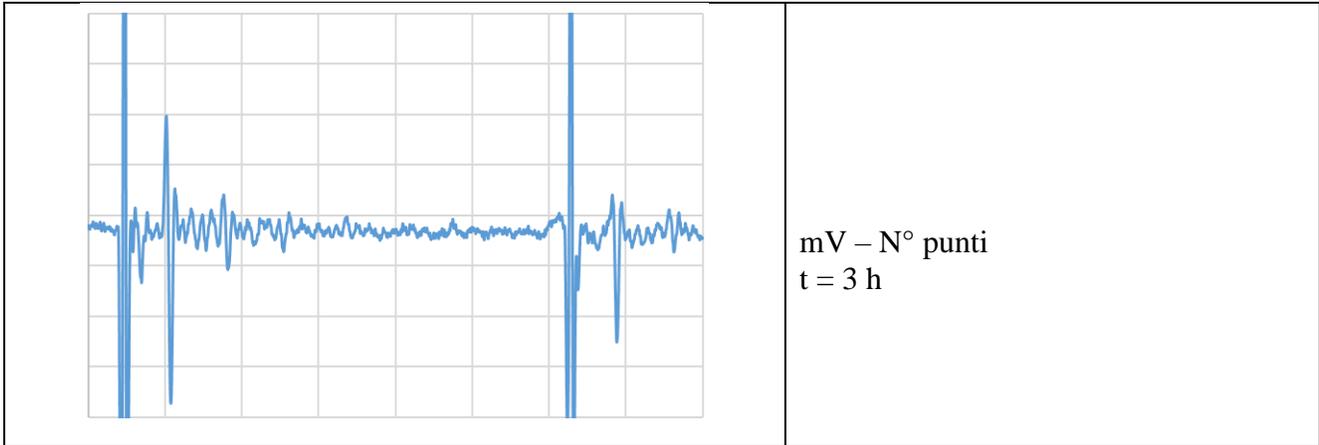
Dopo la volt-off viene osservato il periodo di riposo di 24 ore nel quale cavo e schermo sono cortocircuitati e collegati a terra.

Tabella 8.7
Acquisizioni della fase di Volt-On in polarità negativa

 A graph showing a PEA signal on a grid. The signal is mostly flat with some noise, but has two prominent vertical spikes: one on the far left and one on the far right. The baseline is slightly elevated between the spikes.	mV – N° punti t = 0 h
 A graph showing a PEA signal on a grid. Similar to the first graph, it has two prominent vertical spikes on the left and right. The signal between the spikes shows a slight increase in amplitude and more noise compared to the t = 0 h case.	mV – N° punti t = 0.5 h
 A graph showing a PEA signal on a grid. It features two prominent vertical spikes on the left and right. The signal between the spikes shows a further increase in amplitude and noise, indicating a change in the material's properties over time.	mV – N° punti t = 1 h

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2





In questa prova la costante di tempo di carica del cavo è più che evidente, in particolare si può notare che l'ultimo segnale ha un picco che è più del doppio del picco iniziale della misura. Questa differenza è ancor meglio apprezzabile nella Figura 8.14.

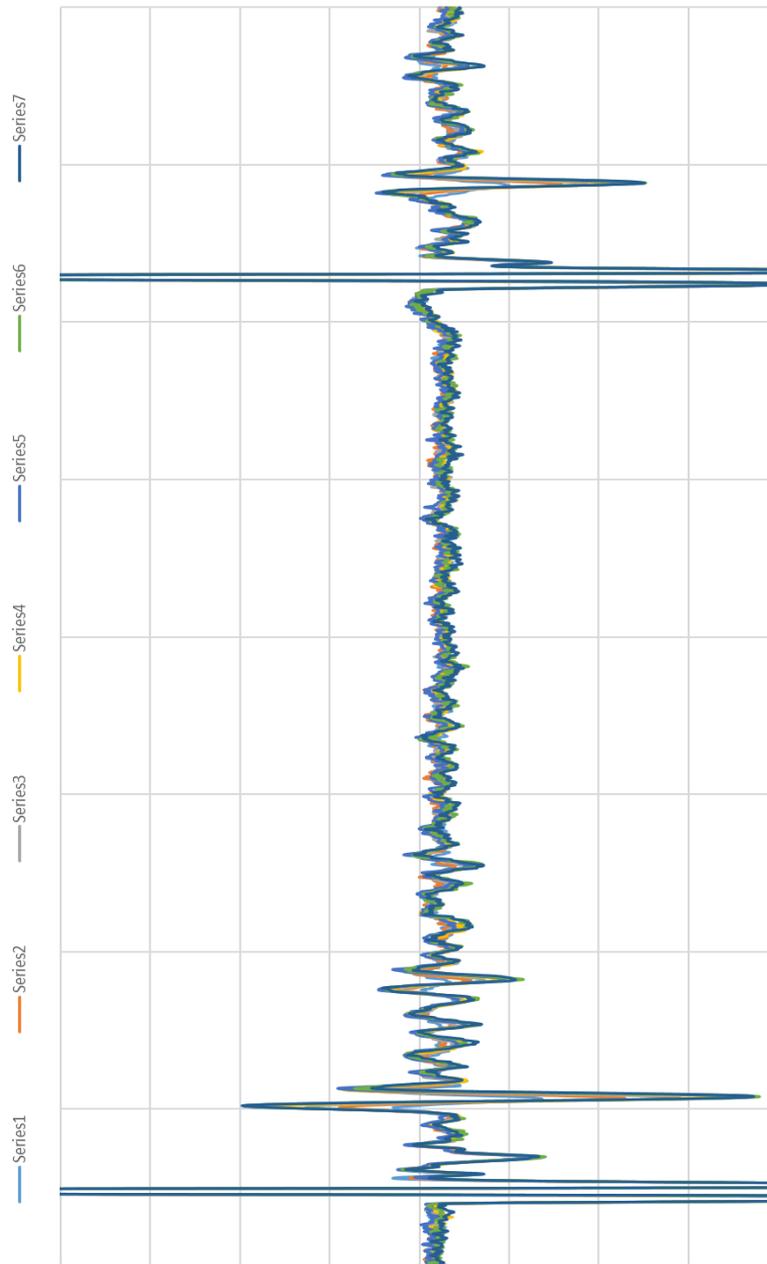
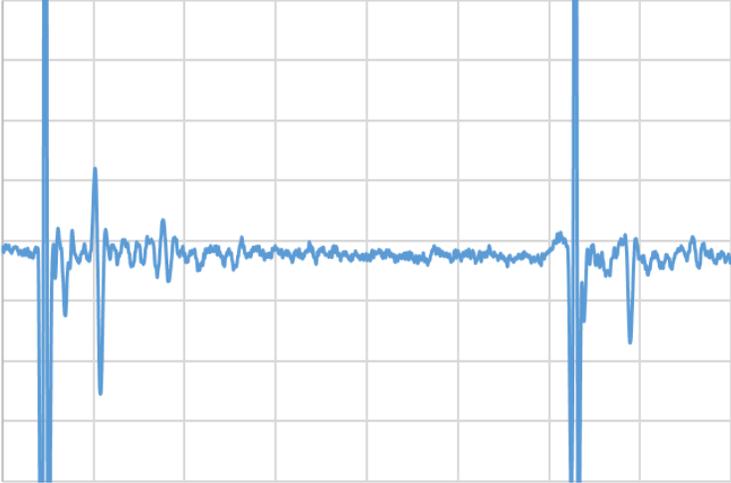
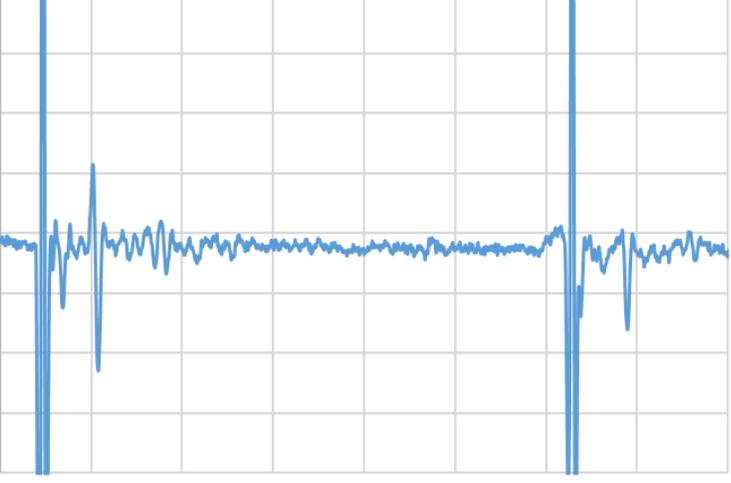
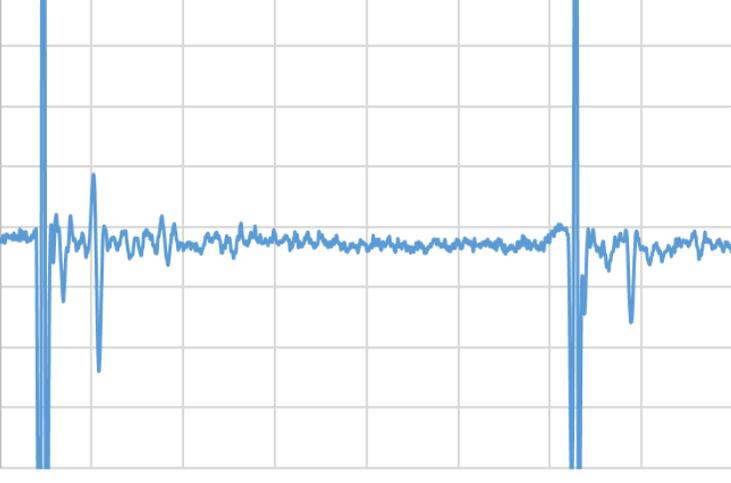


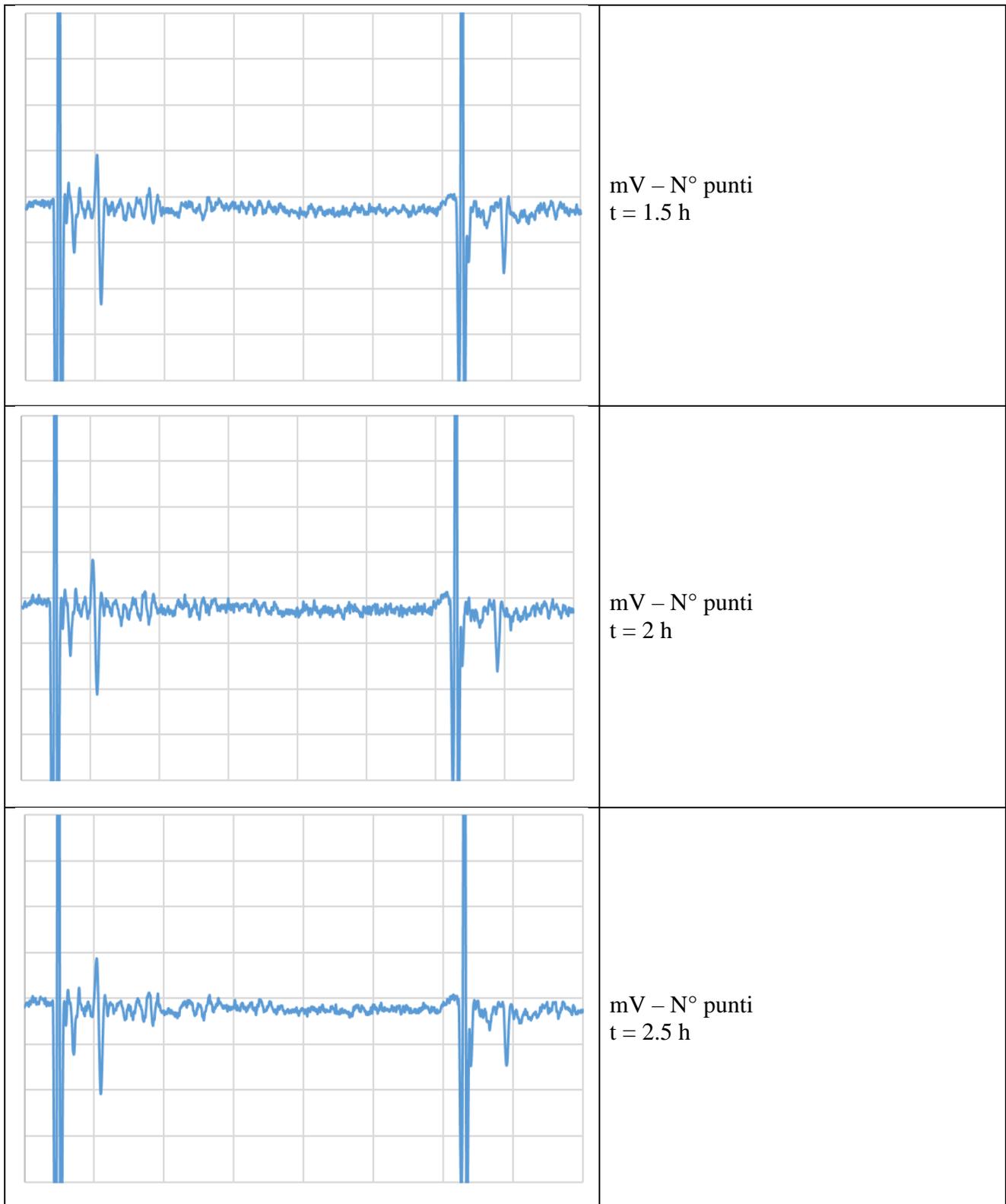
Figura 8.14
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-on negativa del cavo2.

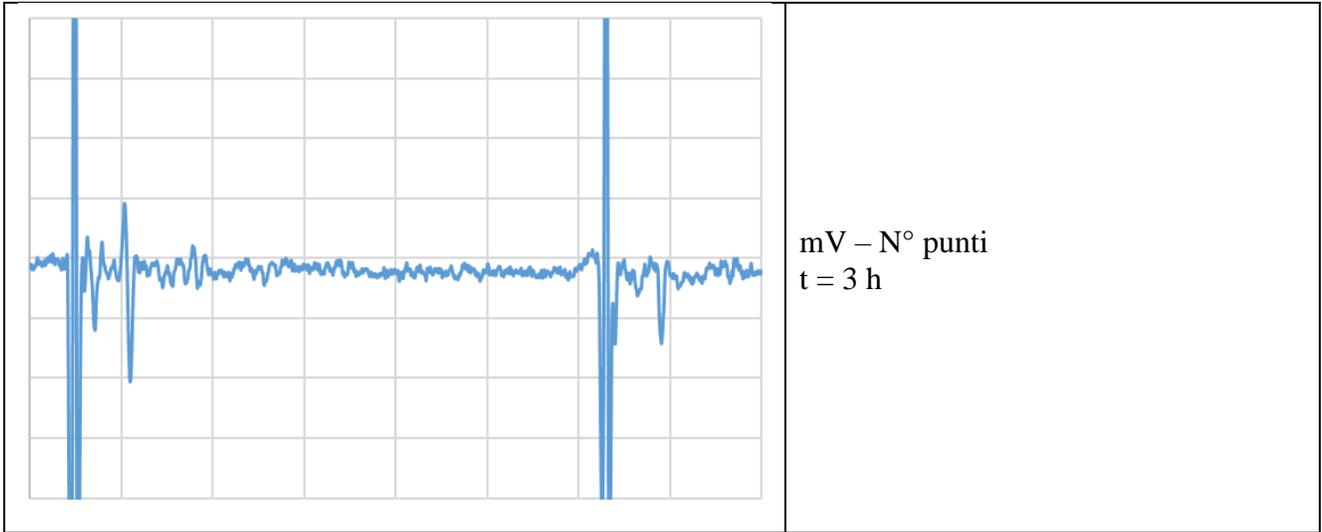
A questo punto il cavo viene messo a terra e quando questo avviene parte la misura di volt-off.

Tabella 8.8
Acquisizioni della fase di Volt-Off in polarità negativa

 A graph showing a blue signal on a grid. The signal has a noisy baseline with two prominent vertical spikes: one on the left side and one on the right side. The right spike is significantly taller than the left one.	<p>mV – N° punti t = 0 h</p>
 A graph showing a blue signal on a grid, similar to the first one. It features a noisy baseline and two vertical spikes, one on the left and one on the right. The right spike is the tallest.	<p>mV – N° punti t = 0.5 h</p>
 A graph showing a blue signal on a grid, similar to the previous ones. It has a noisy baseline and two vertical spikes, one on the left and one on the right. The right spike is the tallest.	<p>mV – N° punti t = 1 h</p>

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2





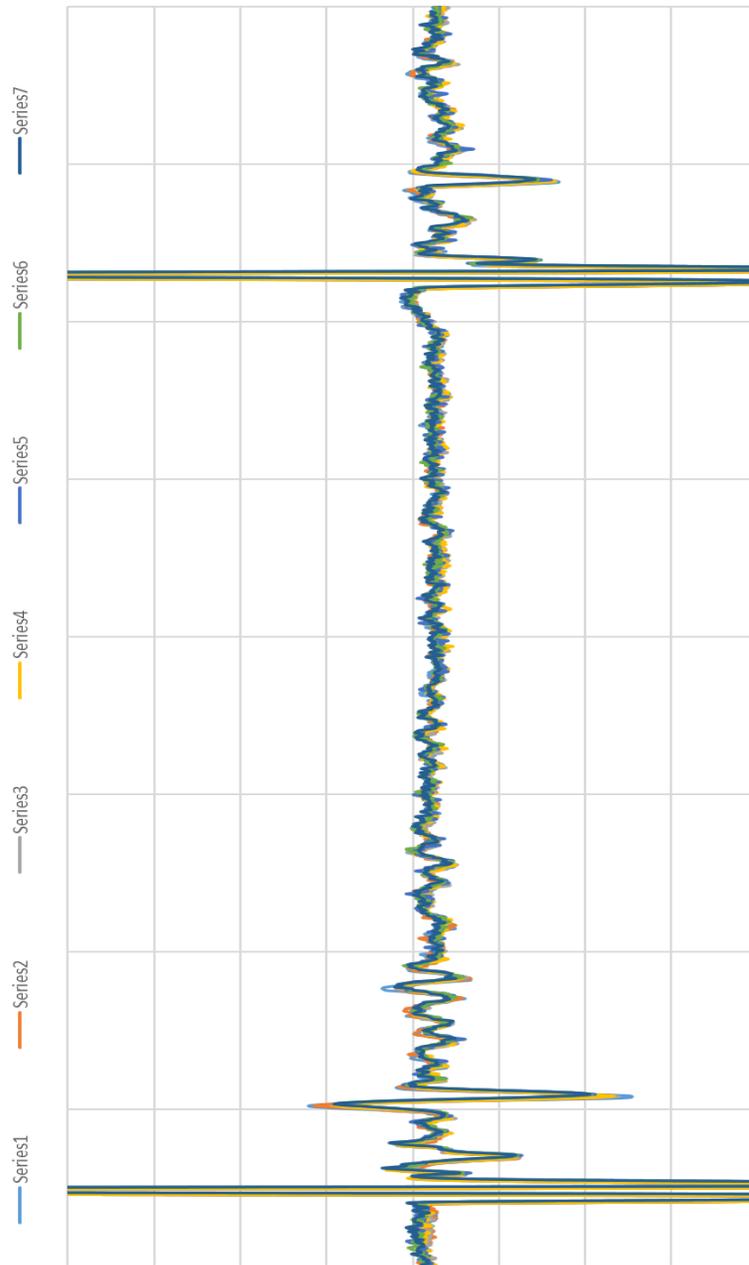


Figura 8.15
mV – N° punti
Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-off negativa del cavo2.

La completa misura di cariche di spazio fatta nel cavo3 viene omessa per brevità. Il risultato ottenuto da questa non è differente da quello delle altre due per i problemi sopra citati. Si riporta però un grafico con a confronto tutte le acquisizioni fatte in fase di volt-on con tensione negativa, questo per

mostrare un pattern estremamente disturbato con delle oscillazioni dell'ordine di grandezza del picco relativo all'elettrodo di terra. In Figura 8.16 si può osservare il risultato della misura.

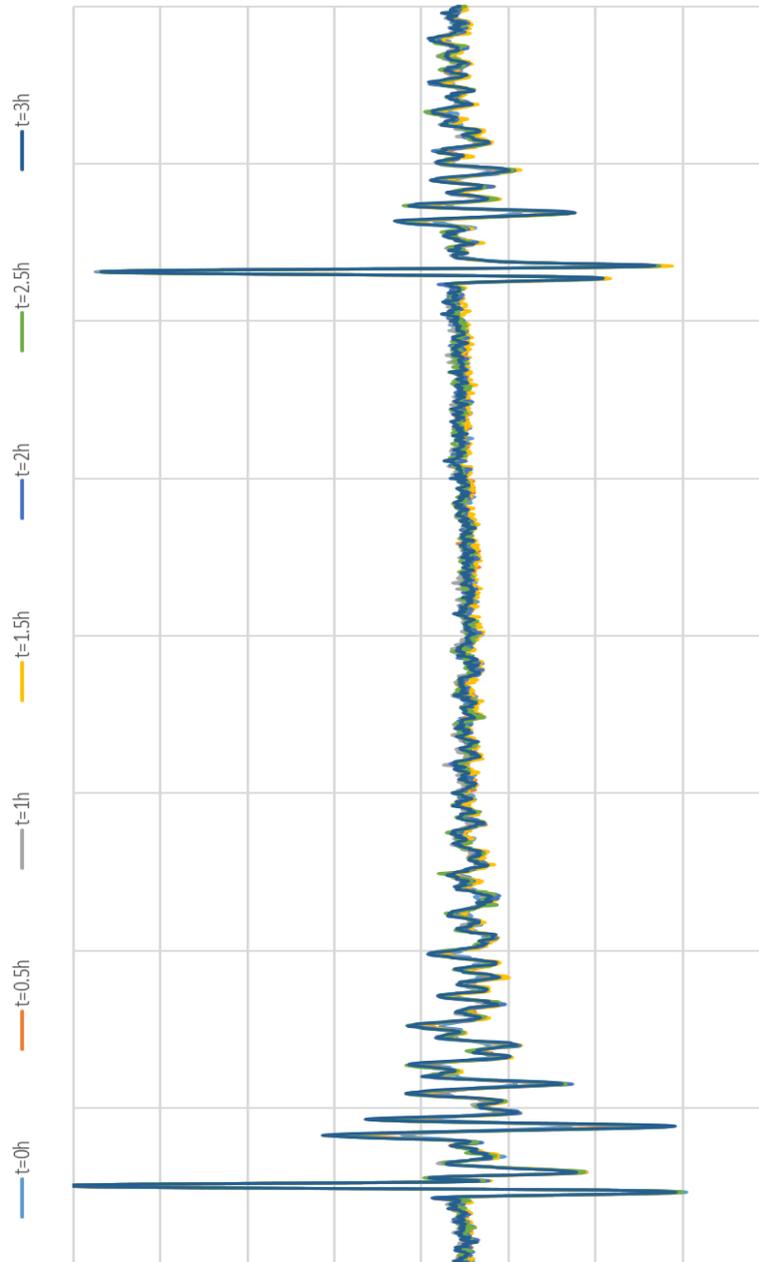


Figura 8.16
mV – N° punti
 Confronto fra le forme d'onda acquisite durante la volt-on negativa del cavo3.

In questa campagna di misure è risultato che l'elaborazione del segnale non può dare un risultato sensato, quello che si è fatto è stata una valutazione qualitativa osservando l'andamento dei pattern.

8. Le misure PEA sui cavi full size – Il progetto IFA2

Non è mai stata osservata una netta distorsione della parte del segnale relativa all'isolante con l'evoluzione del tempo; per questo motivo si afferma che se effettivamente si formasse una distribuzione di carica nello strato isolante questa non è così evidente da essere rilevata. A fronte delle misure fatte è quindi sensato pensare che se vi è una distorsione di campo elettrico questa sarà di entità ridotta.



CONCLUSIONI

9. Conclusioni

9. CONCLUSIONI

Le prove e i test svolti nei negli R&D Electrical Labs di Prysmian hanno portato alla luce diversi limiti e problematiche relativi alle prove di misura di carica spaziale tramite metodo PEA.

Dato che la presente tesi aveva come scopo quello di valutare tutti gli aspetti della misura PEA le conclusioni saranno divise a seconda delle osservazioni fatte e relative ad ogni capitolo.

9.1 I cavi modello

Come si è visto nel Capitolo 6 le configurazioni con cui viene svolta la prova influiscono notevolmente sul risultato della stessa. In particolare si è visto che con alcuni setup i risultati ottenuti sono poco utili ai fini del calcolo della carica interna al dielettrico. Infatti quello che si è ottenuto dalle prove è che, anche alle condizioni di provino vergine, quindi senza carica al suo interno, molti pattern presentano dei disturbi che, in fase di elaborazione, falsano la misura generando dei profili di carica che presentano una densità di carica non nulla nell'isolante.

Questo problema è evidente nel grafico di Figura 9.1.

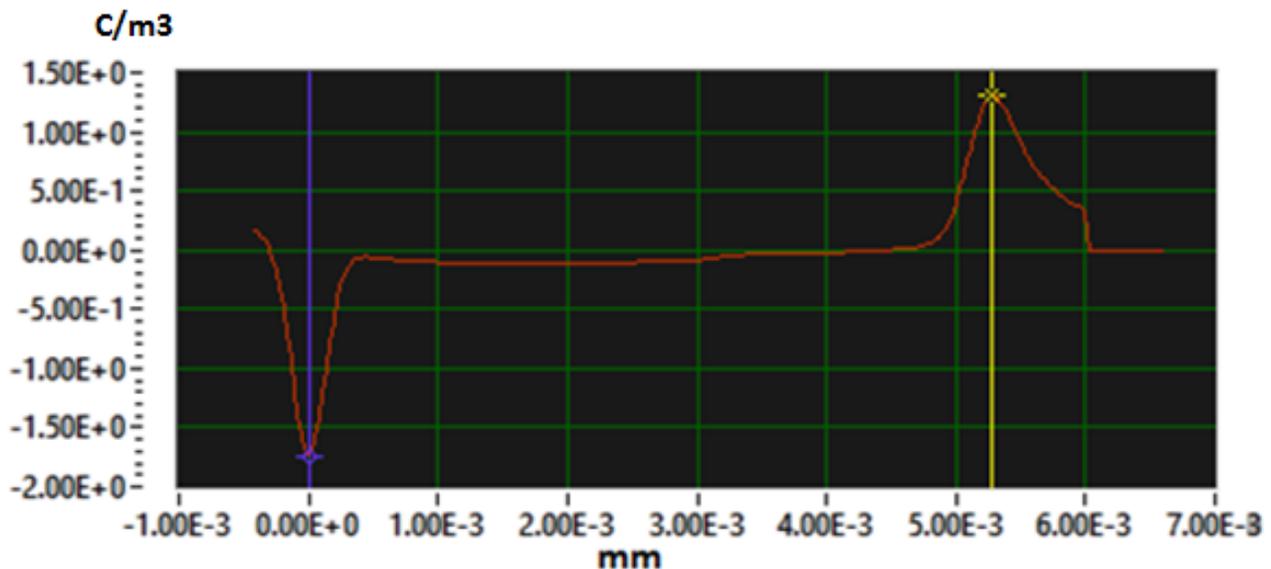


Figura 9.1

1. Distribuzione di carica all'interno del materiale isolante in Q/m^3 in funzione dello spessore
2. Distribuzione del campo elettrico nel materiale isolante in V/mm in funzione del numero di punti utilizzati per il calcolo

9. Conclusioni

Il grafico sopra riportato è relativo al segnale utilizzato per la calibrazione della prova nel paragrafo 6.6.1; come si vede il segnale elaborato presenta una deformazione della parte centrale la quale rimane ad un valore minore di 0 per circa metà della sezione dell'isolante. L'andamento della figura rappresenta quindi una quantità di carica che, sin dall'inizio della prova, è presente nel materiale isolante e che quindi comporta una deformazione del campo elettrico calcolato secondo il metodo proposto nel Capitolo 7. Come detto questo è un risultato non credibile in quanto, ad inizio prova, ci si attende un campo privo di deformazioni date dalle cariche

Tuttavia si è anche visto che per alcune configurazioni particolari è in realtà possibile fare delle prove PEA con risultati che rispecchiano la teoria. Per avere delle misure di questo tipo è però necessario ricondursi a configurazioni particolari nelle quali non devono essere presenti alcuni parametri che importano disturbi. L'idea di fare prove PEA su cavi modello è però quella di testare i materiali isolanti in condizioni che più rispecchiano la realtà; ricondursi alle condizioni di fattibilità della misura vuol dire quindi allontanarsi dallo scopo della prova.

I test svolti hanno dimostrato che la lunghezza del cavo di prova influisce enormemente sul risultato introducendo dei disturbi tipici di fenomeni induttivi. Per un segnale migliore è quindi necessario ridurre la lunghezza del cavo; il cavo deve però soddisfare dei vincoli dati dai terminali (nelle prove del paragrafo 6.6 sono lunghi 3m l'uno), dalla necessità di una parte di cavo sulla quale posizionare la cella e, eventualmente, uno spazio dove inserire i trasformatori per il riscaldamento. Non soddisfare queste condizioni vorrebbe dire fare dei test su configurazioni uguali la cui unica variante è l'accoppiata isolante-semiconduttivo, di fatto diventa un test su materiali.

Nonostante questo le misure PEA possono fornire in maniera **qualitativa** il comportamento delle cariche di spazio di un cavo, questo sfruttando il fatto che il pattern 3D ottenuto è basato sulla differenza di ogni i pattern da quello di calibrazione e quindi si riesce a vedere un'eventuale anomalia che si crea nel tempo. Come si vede in Figura 9.2 il pattern è un perfetto esempio per avere un'idea dei moti e delle zone di accumulo delle cariche di spazio.

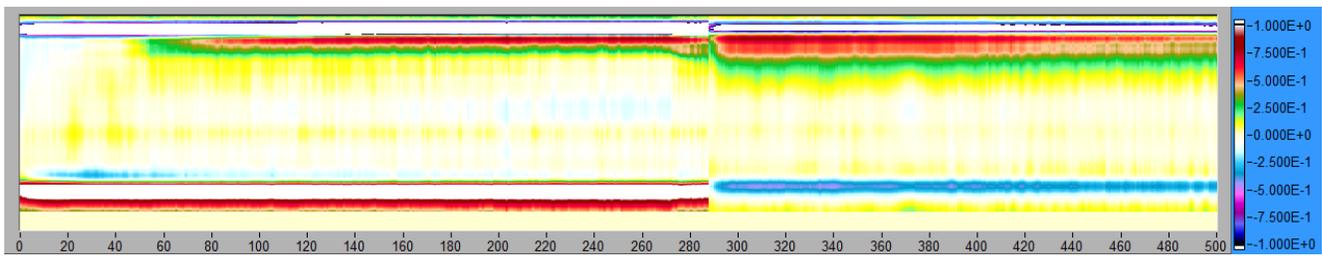


Figura 9.2

Pattern dell'andamento nel tempo della carica lungo lo spessore del cavo. In ascissa si ha il numero di acquisizione, cioè l'evoluzione temporale della prova, l'ordinata corrisponde allo spessore dell'isolante. La legenda dei colori indica la corrispondenza fra il colore e il valore C/m^3

9.2 Il campo elettrico

Nel Capitolo 7 si è spiegato il ragionamento con il quale può essere fatta una valutazione del campo elettrico in presenza di cariche di spazio. Il metodo è assolutamente veritiero, ma anche in questo modo si farebbe un'approssimazione che, in alcuni casi, porterebbe ad un calcolo inesatto del campo.

Oltre alle approssimazioni vi è il problema che una valutazione in tempo reale del campo sarebbe estremamente complessa, infatti entrambi i metodi presentati (paragrafo 7.1.1 e paragrafo 7.1.2) richiedono uno studio delle acquisizioni che non è immediato.

Supponendo di avere un grafico perfetto, quindi senza sovrapposizione di segnali distorti, si deve comunque tenere in conto dell'effetto della non istantaneità della carica del cavo (Figura 9.3).

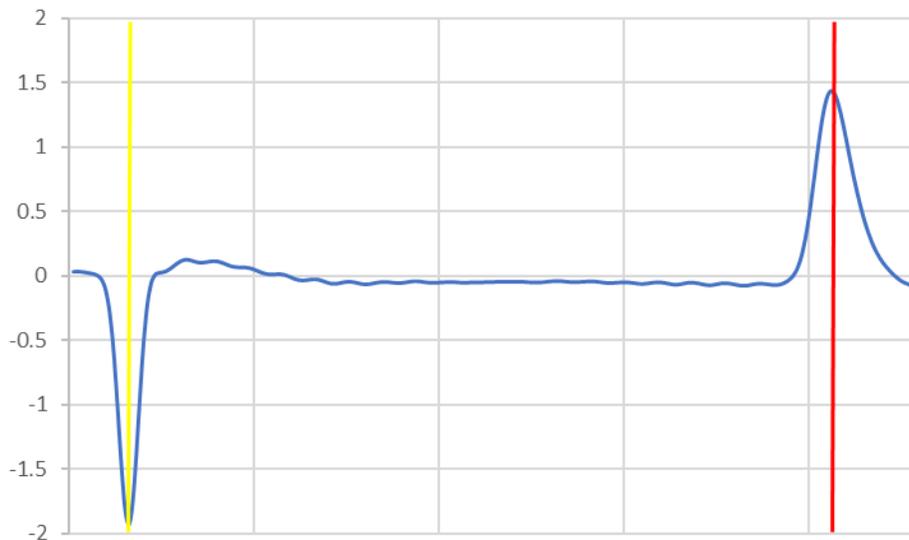


Figura 9.3
 $C/m^3 \cdot mm$

Pattern di una prova PEA con evidente presenza di carica spaziale nei pressi dell'elettrodo di terra

9. Conclusioni

La condizione ideale di un impulso di Dirac non è rispettabile nei sistemi ideali, dove gli impulsi e i picchi non sono istantanei, ma hanno dei tempi di salita e delle code di discesa a volte anche elevate. La non idealità comporta quindi dei picchi che, per loro natura, si sovrappongono ad altri segnali nascondendoli; questo sta a significare che alcune distribuzioni di carica accumulate estremamente vicino agli elettrodi potrebbero essere nascoste dagli impulsi degli elettrodi stessi.

In Figura 9.3 si vedono la linea gialla e quella rossa corrispondono all'interfaccia elettrodi-isolante, sono quindi i confini del dielettrico del cavo. In questo punto vi sono le cariche di interfaccia che danno luogo ai picchi degli elettrodi, esse avranno una forma tale da coprire parte dello spessore del materiale. La valutazione della presenza della carica in questo punto è quindi impossibile se non utilizzando due diversi metodi.

La formazione di cariche di spazio nel dielettrico portano alla creazione di cariche immagine negli elettrodi; le cariche immagine saranno uguali e di segno opposto rispetto a quelle intrappolate nell'isolante. La spiegazione del fenomeno è data dalle leggi della fisica. Una presenza di carica implica una variazione di campo elettrico all'interno del materiale, che deve però essere bilanciata con una reazione esterna per mantenere la relazione $E = -\nabla V$, dove V è applicato dal generatore esterno. La presenza di cariche di spazio nel materiale è quindi riflessa da una variazione dei picchi relativi agli elettrodi; la variazione corrisponde alla carica immagine creata che a sua volta è legata alla carica formatasi nel dielettrico.

- Valutando i picchi è quindi possibile stabilire la carica depositata nel dielettrico. Questo però solo in via teorica, o comunque su provini piani dove la realtà rispecchia la teoria. Su cavi questo metodo non è applicabile sostanzialmente per due motivi. Ancora una volta i disturbi che si sovrappongono al segnale acquisito vanno a modificare il pattern variando il valore dei picchi, la conseguenza è che possono essere rilevate cariche non presenti o perse cariche venutesi a creare.

Il secondo fattore che limita la fattibilità di questo tipo di prova è dato dalla natura capacitiva del cavo. I cavi sono infatti rappresentabili come condensatori cilindrici con un elettrodo al potenziale nominale e l'altro al potenziale di terra; nel momento in cui si applica tensione gli elettrodi non si portano istantaneamente al valore nominale, ma si avrà un incremento graduale della tensione dato dalla costante di tempo τ che è a sua volta funzione di C .

$$\tau \propto C$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

La dinamica della tensione fa sì che le cariche si accumulino sull'interfaccia in tempi più o meno lunghi, di conseguenza anche i picchi del pattern PEA relativi agli elettrodi avranno una dinamica legata al tempo. Questo effetto è particolarmente evidente nei cavi full size dove le dimensioni del circuito di prova sono di notevole importanza; un cavo molto lungo implica un aumento della superficie di affaccio degli elettrodi del condensatore, quindi un valore di C importante.

- Una dinamica dei picchi dovuta a fattori esterni (tensione applicata) introduce un problema con il punto 2 della procedura della normativa elencata nel Capitolo 7. Secondo la raccomandazione la prova deve iniziare quando la tensione sul cavo arriva al valore nominale, nel caso dei full size questo fenomeno può richiedere anche qualche minuto. Durante la carica del cavo, tuttavia, nell'isolante è applicato un gradiente elettrico che potrebbe provocare una variazione di carica, ma questa non sarebbe apprezzabile in termini di carica immagine dato che i picchi degli elettrodi sono in continua evoluzione.

È possibile però utilizzare un altro metodo per la valutazione del campo elettrico. Quello che si può fare è misurare la carica intrappolata all'interno del materiale in assenza dei picchi degli elettrodi e utilizzarla nella simulazione esposta nel paragrafo 7.1.1. Il tipo di misura fatta viene dimostrato con il grafico in Figura 9.4.

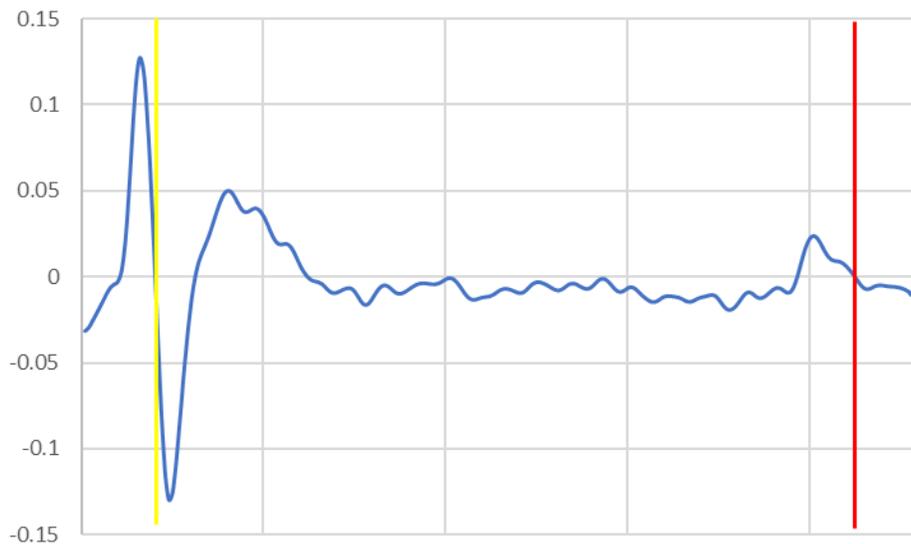


Figura 9.4
 $C/m^3\text{-mm}$

Pattern di una prova PEA, prima acquisizione dopo la volt-off.

Durante la prova la carica viene intrappolata nel dielettrico, ma parte di questa è nascosta dai picchi degli elettrodi. Nel momento in cui si toglie tensione la carica, essendo intrappolata nelle buche di

9. Conclusioni

potenziale, tende a rimanere per un breve periodo nella posizione e quindi si ha il profilo di carica relativo alle sole cariche. Questo metodo è quello utilizzato nei provini piani per la misura della carica intrappolata nel materiale. È ragionevole pensare che questo profilo di carica, se misurato in tempi sufficientemente brevi dopo la volt-off, può essere considerato il medesimo che si aveva con il potenziale impresso; con il profilo di carica si può ora fare una valutazione del campo elettrico mediante simulazione. Questo metodo, tuttavia, ha dei grossi limiti di applicabilità.

- Il cavo ha un tempo necessario per la carica, ma ne ha uno anche per la scarica. In alcune configurazioni, come nel caso dei full size, la scarica può arrivare a durare anche minuti; la cosa è considerata anche dalla norma che richiede un tempo di scarica massimo di 5 minuti. Questo però significa fare la prima misura della volt-off dopo un intervallo di tempo molto lungo se paragonato con la dinamica delle cariche che, già dopo qualche secondo, tendono a riposizionarsi. Questa soluzione vorrebbe quindi dire ricostruire un campo che non coincide con il campo realmente applicato.

- Questo tipo di valutazione ha un altro limite di estrema importanza, specialmente per quanto riguarda le misure svolte in ambito industriale. Infatti per la realizzazione di una sola misura bisognerebbe portare a terra il potenziale del cavo, che è un'operazione brigosa e che richiede tempo; inoltre, per ogni misura, bisognerebbe ripartire con la polarizzazione del cavo da 0 e lasciare il cavo in polarità per il tempo richiesto della misura. Questo vorrebbe dire avere una dilatazione temporale della prova enorme, cosa non applicabile in un ambiente dove il tempo di durata delle prove è scandito e fondamentale per tutti i test.

9.3 I cavi full size

In seguito al Capitolo 8 possono essere fatte diverse riflessioni sulle misure PEA nei cavi full size. Di seguito verranno elencati i problemi riscontrati durante la campagna di misure sui questi cavi. Si può però anticipare che i risultati ottenuti sono deludenti in termini di prestazione del sistema di misura; per questo motivo tutte le riflessioni fatte sin ora hanno una validità teorica anche in questo caso, ma la loro applicabilità è ancor più difficile rispetto ai cavi modello dato che i pattern ottenuti non sono in grado di dare informazioni comparabili a quelle delle prove fatte in altri tipi di isolanti.

9.3.1 Spessore dell'elettrodo

Come si è già discusso nel capitolo 8 la campagna di misure PEA sul progetto IFA2 ha portato alla luce un problema strutturale nel sistema di misura. Nel capitolo 4 si è parlato a fondo della propagazione dei segnali acustici e delle loro riflessioni, in questo caso la sezione di interesse è l'elettrodo di terra. Come già spiegato nel Capitolo 8 la condizione del setup attuale fornisce una risposta il cui picco relativo all'elettrodo interno (conduttore) è sovrapposta alla riflessione del disturbo dell'impulso. Il pattern in Figura 9.5 rappresenta una misura svolta sul cavo.

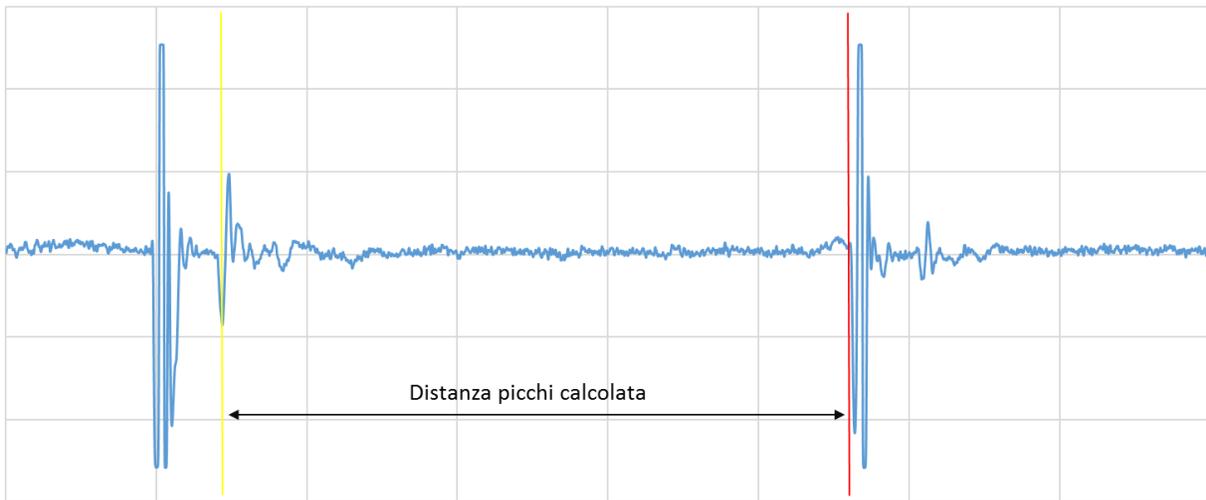


Figura 9.5
mV - N° punti
 Pattern della prova preliminare sul cavo1 del progetto IFA2.

In questa condizione è del tutto impossibile fare una misura sensata. Questo perché il secondo picco non è visibile e in fase di elaborazione del segnale viene preso come elettrodo un riferimento sbagliato, falsando così la valutazione del campo.

Va inoltre aggiunto che l'onda relativa alle cariche sul conduttore deve attraversare tutto l'isolante prima di essere rilevata, durante questo tragitto viene attenuata. Nei cavi modello sono state rilevate attenuazioni fino al 60%; i cavi full size hanno uno spessore dell'isolante diverse volte più grande rispetto a quello dei cavi modello, quindi è ragionevole attendersi un'attenuazione anche maggiore. Per questo motivo non è detto che, anche in caso di corretto dimensionamento dell'elettrodo, si sarebbe potuto rilevare il secondo picco.

9.3.2 I disturbi

Oltre ai problemi progettuali i pattern acquisiti mettono alla luce anche altri problemi relativi alla qualità e fattibilità della misura. Infatti il pattern presenta dei disturbi notevoli, come si vede nel pattern in Figura 9.6.



Figura 9.6
mV - N° punti
Pattern della prova preliminare sul cavo1 del progetto IFA2

In questo caso si tratta di una misura fatta in polarità negativa. Il risultato è un pattern che presenta, subito dopo il picco relativo all'elettrodo esterno, un forte disturbo; la parte cerchiata in rosso è stata riconosciuta come disturbo in quanto, nel tempo, il segnale si modifica mentre questa componente rimane costante. Inoltre il picco di disturbo rimane invariato anche passando da tensione applicata positiva a quella negativa.

Questa distorsione del pattern ha un'ampiezza di circa metà del picco relativo all'elettrodo di terra. Questo vuol dire che, anche se vi fosse stata la possibilità di elaborare il segnale, il picco cerchiato in rosso sarebbe stato riconosciuto come una distribuzione di carica, per di più elevata, producendo così un'elevata distorsione del campo.

Anche la presenza di disturbi così elevati rende impossibile una misura di carica spaziale che possa dare risultati sensati e attendibili.

9.3.3 Il problema delle risorse e del tempo

Sino ad ora è stata fatta una riflessione sugli aspetti tecnici e scientifici del metodo PEA, il fatto che questa misura sia stata proposta come misura aggiuntiva nei test di fabbrica ha però portato alla luce alcuni problemi tipici degli ambienti industriali.

La raccomandazione IEEE Std 1732-2017 descrive le modalità da seguire per fare la prova definendo anche il tipo di circuito da provare. In sostanza si hanno 2 possibilità per lo svolgimento delle prove di carica spaziale nei cavi:

- a) Test sul circuito in prova
- b) Test su un circuito immagine rispetto a quello in prova; entrambe i circuiti devono essere sottoposti ai medesimi stress elettrici

La misura PEA è una misura non distruttiva, ma estremamente invasiva se si considera un circuito in prova nella sua completezza. Infatti per il test è necessario rimuovere parte dello schermo del cavo; la rimozione di parte dello schermo è inaccettabile in un test che deve riprodurre le condizioni reali, quindi è necessario che la prova PEA sia fatta a fine test, quando questa modifica non inficia in eventuali test futuri.

Il vero problema è tuttavia relativo alla fase di calibrazione nel caso si segua il metodo a), dato che viene richiesta una prova antecedente ai test, con cavo vergine. La rimozione dello schermo risulterebbe una modifica permanente al sistema, perciò il test deve essere fatto nel punto in cui verrà successivamente installato un giunto; in tal caso la rimozione dello schermo sarebbe stata comunque necessaria per l'installazione del giunto. Sicuramente non si hanno problemi sulla fattibilità della prova, ma il problema è di carattere temporale. Procedere in questa maniera vorrebbe dire fare un giunto su uno spezzone di cavo già posizionato per la prova, quindi con i relativi terminali e il sistema di riscaldamento; considerando gli spazi ridotti dei recinti per i test elettrici la realizzazione di questa misura diventa molto complessa aumentando i tempi di prova e quindi dilatando le tempistiche dei test.

Optando invece per il metodo di prova b) i problemi sono, oltre che di durata dei test, anche di tipo economico. L'installazione di un circuito in parallelo a quello di prova richiede infatti l'utilizzo di altri due terminali, elementi costosi e delicati nell'installazione, e la necessità di uno spazio ulteriore di un centinaio di metri quadri dove alloggiare il circuito immagine. Inoltre ogni circuito dovrà avere il relativo sistema di calibrazione termica e i relativi sistemi di riscaldamento. Quello che si capisce è che una

realizzazione del genere richiede numerose ore di lavoro e investimenti economici non trascurabili, specialmente se si considerano i deludenti risultati ottenuti con i sistemi di misura dello stato dell'arte.

9.4 Considerazioni finali

Lo studio svolto in questa tesi ha portato a delle riflessioni sulle prove PEA nei cavi. Non si faranno congetture sulla fisica del fenomeno della formazione di carica spaziale, o sulla fisica che sta dietro alla tecnica di misura, ma delle considerazioni sugli aspetti tecnici e sull'impatto che queste prove possono avere nell'ambito dei test elettrici.

Allo stato dell'arte il sistema per le misure PEA non ha le performance attese per poter fare delle valutazioni oggettivamente affidabili. Per come funziona l'elaborazione del segnale si ha che la medesima acquisizione può essere elaborata in maniera diversa a seconda dell'operatore. Supponendo che diverse celle diano comunque la medesima risposta (vero se giustamente progettate) non è detto che vengano usati sempre i medesimi parametri per l'elaborazione (filtri, array del segnale deconvoluto, ecc.). Questo porta all'ottenimento di valori di carica diversi da un'elaborazione all'altra; la differenza non sarà molta, ma non è comunque definibile la precisione della misura. Oltre alla precisione, in questo genere di prove, è impossibile definire se i valori letti sono effettivamente quelli reali. Il limite è dato dal fatto che non esiste una calibrazione. Sarebbe necessario avere una distribuzione di carica di quantità definita in un campione e verificare che lo strumento di misura sia effettivamente in grado di rilevare il medesimo valore, o comunque calibrare la risposta in funzione del valore noto.

Oltre ai problemi di elaborazione è necessario anche approfondire gli studi sui disturbi introdotti nella misura a seconda del setup e capire come eliminarli. Dover adattare il circuito al sistema di misura è un grosso limite di questa prova e rende inutile il proposito per la quale viene fatta; se devono essere eliminate tutte le componenti caratterizzanti il circuito si riduce la prova ad una semplice valutazione del materiale, che può essere fatta tramite studi su provini piani, dove la tecnologia è ben consolidata e già utilizzata in larga scala.

Nei cavi full size la misura di carica di spazio è ancor più difficile perché, come visto, il segnale è soggetto ad ampi disturbi e il secondo picco non è sempre distinguibile. In questo tipo di misure il

circuito è vincolato dalle richieste delle norme e quindi non può essere modificato per migliorare il segnale misurato; si avranno quindi dei pattern distorti e disturbati in grado di fornire informazioni non troppo certe. In questo ambito di prove, inoltre, la discussione più gravosa è sull'interpretazione da dare ai risultati ottenuti. Un cavo che supera con successo un pre-qualification test è considerato un cavo assolutamente affidabile per la mansione per il quale è stato progettato (considerazioni poi riscontrate sul campo); se alla fine del test la prova PEA rilevasse una certa quantità di carica all'interno del cavo non si sa come interpretare tale risultato. Al momento non vi sono studi che correlano la presenza di carica di spazio con la qualità e l'affidabilità di un cavo, il che vorrebbe dire che, allo stato dell'arte, sarebbe un po' affrettato discriminare l'esito dei test di un cavo tramite questo tipo di misure.

La misura di carica di spazio è una misura ormai di vecchia data utilizzata per la caratterizzazione dei materiali dielettrici che vengono accoppiati ai cavi estrusi. In particolare sono state svolte diverse ricerche per caratterizzare il comportamento dell'accoppiata semiconduttivo-isolante fra la vasta scelta disponibile e valutarne la migliore. Tuttavia, per quanto questo metodo possa essere consolidato nel campo di provini piani, il sistema di misura PEA è stato adattato ai provini cilindrici introducendo delle approssimazioni e lasciando aperte ancora molte lacune. La misura PEA è una misura locale, infatti l'area dell'isolante del cavo valutata si limita ai soli centimetri che ricoprono l'elettrodo di terra. Tutti questi motivi hanno portato a pensare che queste misure non siano degli indicatori particolarmente funzionali riguardo lo stato di un cavo, ma piuttosto hanno una buona utilità in fase di valutazione dei materiali da utilizzare. In conclusione è quindi ragionevole pensare che l'utilizzo delle misure di carica spaziale debba essere concentrato specialmente nei test su materiali, mentre deve essere trattato con molta cautela nelle misure su cavi.

9.5 Soluzioni migliorative

Per quanto riguarda il problema delle riflessioni relativo alla cella dei cavi full size è già stato studiato un nuovo elettrodo, di diverso spessore, tale da poter allontanare la riflessione del disturbo e rendere possibile l'eventuale rilevamento del secondo picco

Per quanto riguarda i cavi modello è stata aperta una collaborazione con l'azienda produttrice degli strumenti di misura in modo da cercare delle nuove configurazioni più compatte che permettano un miglior risultato di misura. Basandosi sugli studi fatti in letteratura [6] si è deciso di sviluppare il sistema in maniera da poter iniettare l'impulso direttamente dalla cella. Queste prove verranno fatte nei prossimi mesi sia su cavi modello che su cavi full size, in modo da valutare eventuali migliorie in entrambe i tipi di prova. Una volta ottenuti i risultati della prova sarà comunque necessario valutare con attenzione il circuito equivalente di accoppiamento dell'impulso; è infatti necessario capire con esattezza in che direzione agire per ottenere un setup in grado di adattarsi al circuito di misura e non viceversa.

Infine se si otterranno risultati validi e ripetibili sarà necessario rettificare i software di elaborazione dei dati. In questo modo i risultati considerati saranno effettivamente riportati alle condizioni che corrispondono a quelle reali dei cavi, il tutto senza approssimazioni.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Marzinotto M., Mazzanti G.. “*Extruded cables for high-voltage direct-current transmission. Advances in Research and Development*”. JohnWiley & Sons. Hoboken, New Jersey (2013).
- [2] Ilich G. “*Nuove metodologie per la caratterizzazione di materiali polimerici per applicazioni HVDC*”. Bologna (1998).
- [3] Kreuger F. H., “*Industrial High DC Voltage*”, Delft University Press, Delft, The Netherlands.
- [4] IEEE Std 1732-2017. “*IEEE Recommended Practice for Space Charge Measurements on Hig-Voltage Direct-Current Extruded Cables for Rated Voltage up to 550kV*”.
- [5] Chuanyang L., Chuanjie L., He J.. “*The control mechanism of surface traps on surface charge behavior in alumina-filled epoxy composites*”. Article in Journal of Physics D Applied Physics. Tsinghua University, Beijing, China (2016).
- [6] Montanari G.C., Laurent C., Perego G., Teysseire G.. “*Charge Recombination Induced Luminescence of Chemically Modified Cross-Linked Polyethulene Materials*”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (2009).
- [7] Xia W., Jinzhou X., Jiaqi H., Kai W., MingLi F. Chen G.. “*Comparison and Analysis of Three Pulse Injection Methods in the PEA Technology Used for Long Cable*”.
- [8] Y. Li “*Space charge measurement in lossy solid dielectric materials by pulsed ElectroAcoustic method*” Tesi di Ph.D., Musashi Institute of Technology, Tokyo, Japan 1994.
- [9] Mori H., Niinobe H., Yagi Y.. “*Space charge measurements and characteristics of HVDC XLPE cable*”. Jicable-HVDC 2013. VISCAS Corporation, Japan.
- [10] G. Mazzanti. “*High Voltage Engineering*” appunti della lezione, Bologna, 2016.
- [11] SPELLMAN. “*High voltage reference manual*”.
- [12] Tsuguya M., Yasuhiro T., Takada T., “*Measurement of Space Charge Distribution in XLPE Cable using PEA system with Flat Electrode*”. Musashi Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- [13] Xu X., Lei Z., Song J., Lin L., Zeng J., Li Y., Wang W.. “*Development of the Space Charge Measurement Techniques Based on Pulsed Electric-acoustic Method for HVDC Power Cables*”. Shanxi Key Laboratory of Coal Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, College of Electrical and Power Engineering , Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi Province, China.

10. Bibliografia

- [14] Bodega R.. “*Space Charge Accumulation in Polymeric High Voltage DC Cable Systems*”. Tesi di dottorato. Universiteit Delft, Delft, Netherland 2006.
- [15] Fleming R. J.. “*Space Charge in Polymers, Particularly Polyethylene*”. Department of Physics Monash University, Clayton, Australia, 1998.
- [16] L.A.Dissado, O. Paris, T. Ditchi, C. Alquie, J. Lewiner. “*Space Charge Injection and Extraction in High Divergent Fields*”. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999.
- [17] F. N. Lim, R. J. Fleming. “*The Temperature Dependence of Space Charge Accumulation and DC Current in XLPE Power Cable Insulation*”. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999.
- [18] S. Delpino, D. Fabiani, G. C Montanari, C. Laurent, G. Teysedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, L. A. Dissado. “*Polymeric HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 1: Insulation/Semicon Interface*” IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2007, Vol. 23 No. 6.
- [19] S. Delpino, D. Fabiani, G. C Montanari, C. Laurent, G. Teysedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, L. A. Dissado. “*Polymeric HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 2: Insulation Interfaces*” IEEE Electrical Insulation Magazine, January/February 2008, Vol. 24 No. 1.
- [20] S. Delpino, D. Fabiani, G. C Montanari, C. Laurent, G. Teysedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, L. A. Dissado. “*Polymeric HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 3: Effects of Temperature Gradient*” IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2008, Vol. 24 No. 2.
- [21] U.H. Nilsson, J-O. Boström. “*Influence of the semiconductive material on space charge build-up in extruded HVDC cables*”. Borealis AB Stenungsund, Sweden.
- [22] G. Mazzanti, G. C. Montanari, and L. A. Dissado, “*Electrical aging and life models: the role of space charge*” IEEE Trans. Dielectr. Electr Insul., vol. 12, no. 5, Oct. 2005.
- [23] A. Tzimas, L. Boyer, P. Mirebeau, S. Dodd, J. Castellon, P. Notingher. “*Qualitative analysis of PEA and TSM techniques on a 200kV extruded cable during a VSC ageing program*”. Dielectrics (ICD), 2016 IEEE International Conference. Montpellier, France. July 2016.
- [24] W. Choo Chin Tze. “*Space Charge Determination in HVDC Power Cable and its Influence on Electric Field*”. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. University of Southampton Faculty of Engineering, Science and Mathematics (2010).

- [25] W. Choo, G. Chen, S. G. Swingler. “*Electric Field in Polymeric Cable due to Space Charge Accumulation under DC and Temperature Gradient*”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. School of Electronics and Computer Science University of Southampton (2011).
- [26] Shuqi L., Li L., Jiandong W., Yi Y.. “*Investigation of Space Charge Behavior of HVDC XLPE Cables Using PEA Method*”. Conference Proceedings of ISEIM 2014. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China (2014).
- [27] X. Xu, Z. Lei, J. Song, L. Lin, J. Zeng, Y. Li, S. Wang. “*Development of the Space Charge Measurement Techniques Based on Pulsed Electric-acoustic Method for HVDC Power Cables*”. High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016 IEEE International Conference. College of Electrical and Power Engineering , Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi Province, China (2016).
- [28] I.M. Zimmerling, I.A. Tsekmes, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, T.J. Person, T. Geussens, “*Space charge analysis of modified and unmodified XLPE model-cables under different electric fields and temperatures*”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015 IEEE Conference. Ann Arbor, MI, USA, (2015).
- [29] W. Xia, L. Quanyu, Z. Xiaoyang, W. Kai, Z. Chong, L. Wenpeng. “*Study on Space Charge Behavior of XLPE after Long-term Aging under Temperature Gradient and DC Stress*”. 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi'an, China, (2016).
- [30] Y. Tanaka, R. Kodera, T. Kato, H. Miyake, H. Mori, Y. Yagi. “*Observation of Space Charge Accumulation Behavior in Cross-linked Polyethylene at Voltage Polarity Reversal*”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015 IEEE Conference. Ann Arbor, MI, USA, (2015).