

## Capitolo V

# Discussione dei risultati

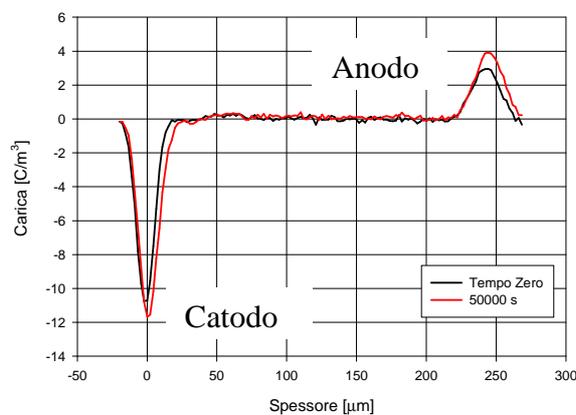
---

Le prove di conducibilità effettuate sul polietilene reticolato puro (XLPE 845/01), consentono di trarre importanti conclusioni sul meccanismo che regola la conduzione in questo materiale.

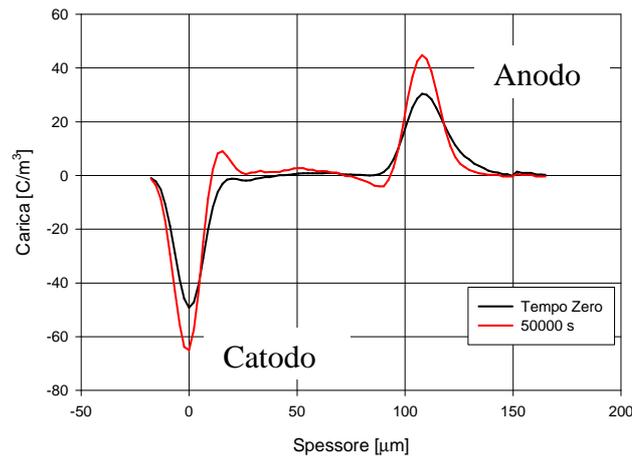
I risultati ottenuti nelle prove di PEA, inoltre, forniscono utili informazioni per meglio interpretare i risultati delle misure di conducibilità. Nelle Fig. 5.1, 5.2 e 5.3 è riportato l'andamento della carica accumulata nell'XLPE 845/01 a tre diversi valori del campo applicato. Il primo, 8.7 kV/mm, corrispondente ad un campo per il quale è valida la conduzione ohmica (Fig. 4.2). Il secondo ed il terzo (rispettivamente 40 e 60 kV/mm) corrispondono, invece, a valori di campo superiori alla soglia di transizione  $E_{t01}$ , evidenziata nella Fig. 4.2.

Dalla Fig. 5.1 si evince che, per valori di campo minori della soglia di transizione,  $E_{t01}$ , non si accumula carica all'interno del provino e che l'unica carica presente è quella sulla superficie di contatto elettrodo-dielettrico.

Dalle Fig. 5.2 e 5.3 si può osservare, invece, che per valori di campo superiori alla soglia di transizione si ha accumulo di carica nel provino. In particolare nella Fig. 5.2 si nota accumulo di eterocarica ad entrambi gli elettrodi, mentre nella Fig. 5.3 si vede accumulo di omocarica davanti al catodo e di eterocarica dinanzi all'anodo.

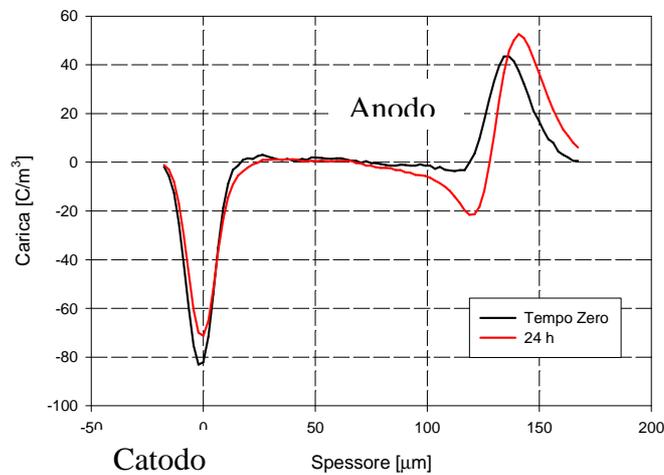


**Figura 5.1**  
*Accumulo di carica a 8.7 kV/mm nell'XLPE 845/01.*



***Figura 5.2***

*Accumulo di carica a 40 kV/mm nel XLPE 845/01*



***Figura 5.3***

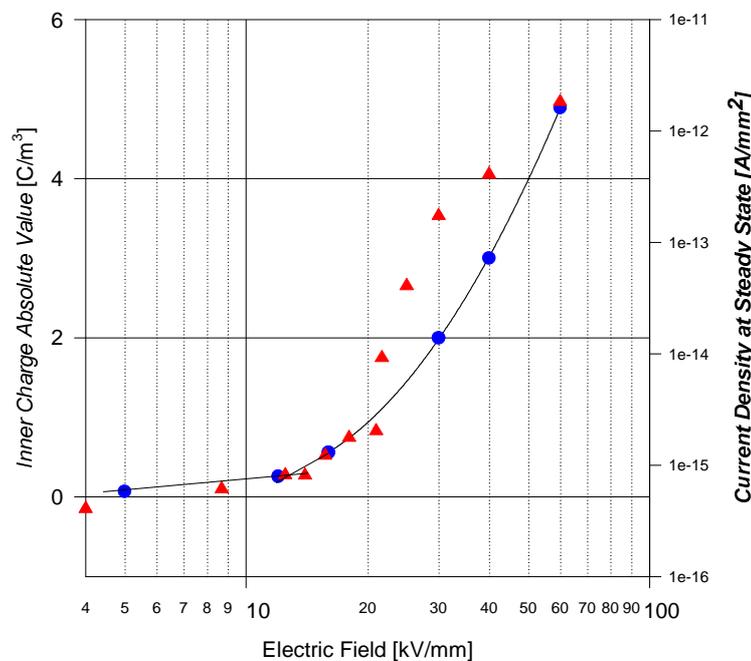
*Accumulo di carica a 60 kV/mm nel XLPE 845/01*

Queste figure sembrano confermare l'ipotizzata correlazione tra la soglia di transizione, rilevata nelle caratteristiche J-E delle misure di conducibilità, e l'accumulo di carica spaziale. In queste condizioni, quindi, il valore di  $E_t$  può essere assunto come parametro qualificante per il materiale. Al di sotto di questo valore è lecito aspettarsi che il materiale non sia invecchiato dalla sollecitazione elettrica.

Informazioni analoghe a quelle ottenute con le prove di conducibilità, o meglio dalle caratteristiche J-E, sono state ottenute, come detto, anche con le prove di PEA senza inversioni. I risultati di queste prove, infatti, hanno evidenziato l'esistenza di un valore di campo al di sotto del quale non si rileva accumulo di carica. Inoltre questa soglia è risultata notevolmente diversa per diversi materiali (Figg. 4.39, 4.45, 4.49 e 4.53), sintomo del fatto che l'introduzione di additivi è effettivamente in grado di modificare i meccanismi di intrappolamento (e anche di conduzione).

La Fig. 5.4 riporta nello stesso diagramma la caratteristica J-E (prove di conducibilità) e la caratteristica carica-campo (prove di PEA) relative all'XLPE 845/01. E' significativo notare come le due soglie risultino sostanzialmente coincidenti. Questo risultato è molto interessante, in quanto per la prima volta si ha un riscontro positivo nel confronto tra due tecniche diverse per l'ottenimento della soglia elettrica in tempi brevi.

Misurando, però, due cose che, per quanto legate, sono fenomeni fisici ben distinti (corrente di conduzione e carica spaziale netta), le due tecniche risultano influenzate in modo diverso dagli additivi. Nei materiali additivati, infatti, non si riscontra la stessa perfetta sovrapposizione di soglie evidenziata in precedenza (per il materiale 845/03, ad esempio, la Fig. 4.45 mostra una soglia a 14 kV/mm e la Fig. 4.16 una soglia a 9 kV/mm). Questo, però, non sminuisce le potenzialità del metodo, ma evidenzia la necessità di integrare le due prove l'una con l'altra, per avere informazioni realmente complete sulla soglia elettrica.



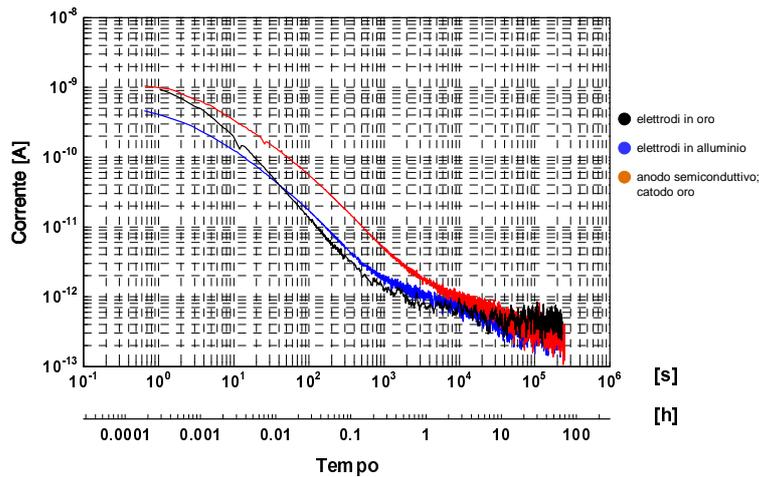
**Figura 5.4**

*Confronto tra la caratteristica J-E (prove di conducibilità) e la caratteristica carica-campo (prove di PEA) relative all'XLPE 845/01.*

Relativamente al meccanismo di conduzione dell'XLPE 845/01, nella Fig. 5.5 sono riportate le caratteristiche di carica ottenute a 8.7kV/mm con tre diversi tipi di elettrodi (diversi materiali, par. 4.1.1). Poiché il valore della corrente a regime è il medesimo in tutti i casi, si può ipotizzare un meccanismo di conduzione prevalentemente ionico (il quale è indipendente dal materiale elettrodico). Per valori di campo elettrico applicati maggiori della soglia di transizione  $E_{t01}$ , invece, il valore della corrente a regime dipende dal tipo di metallizzazione usato (Fig. 5.6) e si

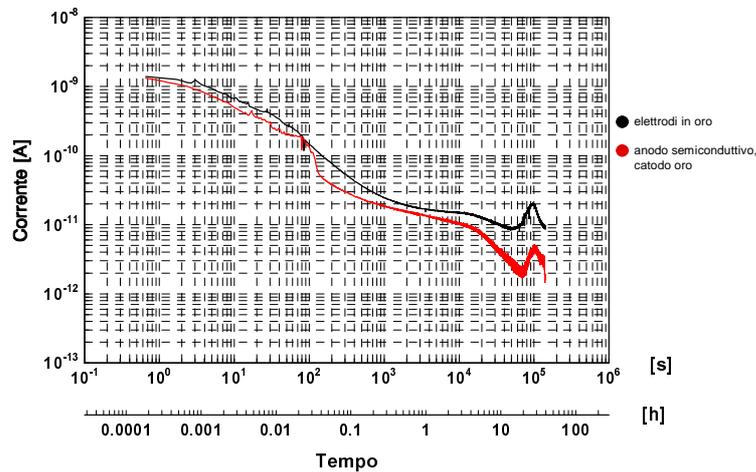
può, quindi, concludere che i portatori di carica non sono più esclusivamente ionici ma anche elettronici.

Le Fig. 5.2 e 5.3 mostrano che per un valore di campo elettrico pari a 40 kV/mm si ha formazione di eterocarica dinanzi ad entrambi gli elettrodi, mentre a 60 kV/mm si comincia ad accumulare omocarica in prossimità del catodo. Sulla base di queste informazioni si può supporre che, all'aumentare del campo elettrico, il meccanismo di conduzione dovuto ai portatori elettronici diventi predominante rispetto a quello di conduzione ionica.



**Figura 5.4**

*Corrente di carica a 8.7kV/mm al variare del materiale elettrodico a 20°C: elettrodi in oro (curva nera); elettrodi in alluminio (curva azzurra); elettrodi misti: anodo semiconduttivo, catodo oro (curva rossa).*



**Figura 5.5**

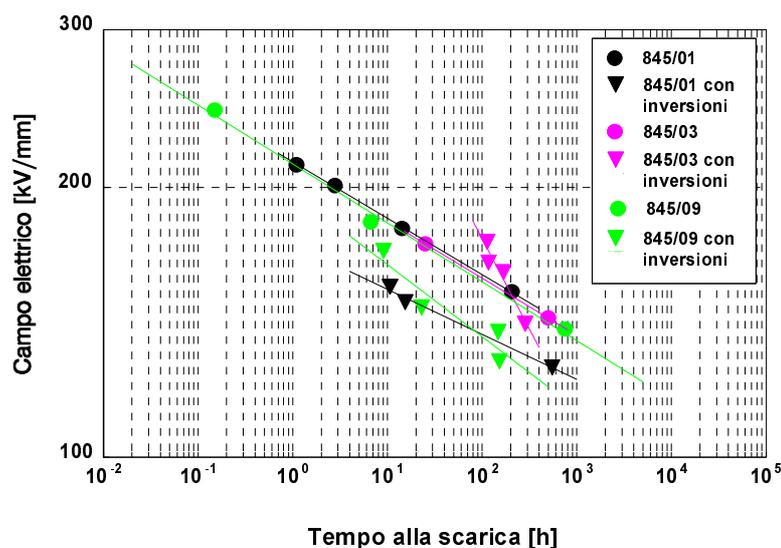
*Corrente di carica a 25.2kV/mm al variare del materiale elettrodico a 20°C: elettrodi in oro (curva nera); elettrodi misti: anodo semiconduttivo, catodo oro (curva rossa).*

Generalmente, quando la caratteristica J-E presenta il tipico andamento della teoria SCLC, si conclude che i portatori di carica sono prevalentemente elettronici, anche se, come nel caso dell'XLPE 845-01, la retta che approssima i punti della caratteristica tempi al picco-campo

elettrico ha pendenza diversa da quella indicata da Many e Rakavy. I risultati ottenuti, invece, mostrano che, per campi elettrici applicati inferiori alla soglia di transizione  $E_{t01}$ , il valore della densità di corrente a regime è indipendente dal materiale elettrodico utilizzato e, quindi, i portatori di carica devono necessariamente essere prevalentemente ionici. Si può quindi affermare che il comportamento dell'XLPE è ohmico (cioè che la densità di corrente a regime è proporzionale al campo elettrico applicato) fino a quando i portatori di carica sono di tipo ionico e che la soglia di transizione  $E_{t01}$  rappresenta un vero e proprio limite, oltre il quale cambiano i meccanismi che regolano la conduzione nel materiale.

Il motivo che porta al cambio di meccanismo di conduzione non è chiaro. I risultati del PEA, però, sembrano indicare che l'ipotesi più probabile sia quella secondo la quale il campo elettrico diventa sufficientemente alto da far sì che l'effetto Schottky diventa prevalente. In queste condizioni l'iniziale formazione di eterocarica, facendo aumentare il valore del campo elettrico in prossimità degli elettrodi, facilita l'iniezione per effetto Schottky. Questa considerazione, però, contraddice uno dei postulati della teoria SCLC secondo la quale l'iniezione di carica è invece limitata dall'omocarica che si deve formare in prossimità degli elettrodi. Per questa ragione, più che di correnti limitate dalla carica spaziale, in questo caso si dovrebbe parlare di correnti assistite dalla carica spaziale (*SCAC, space charge assisted current*). Tale fenomeno, mai considerato in precedenza, merita sicuramente ulteriori ed approfondite analisi.

Le prove di PEA possono essere utilizzate anche per spiegare il comportamento rilevato nelle prove di vita (par. 4.3). Nella Fig. 5.6 sono riassunti i dati relativi alle prove di vita eseguite.



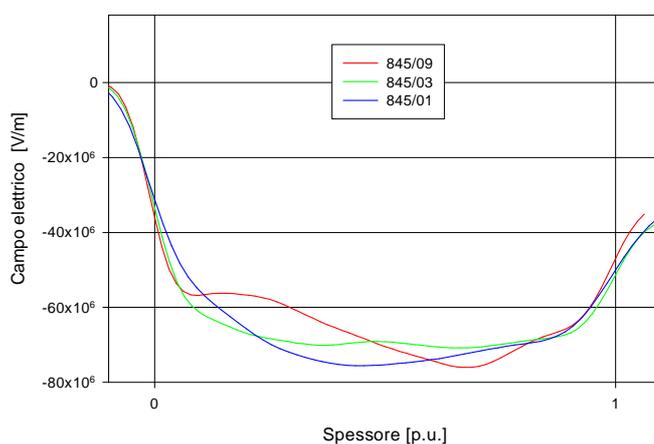
**Figura 5.6**

Confronto tra le curve di vita con e senza inversioni di polarità dei tre materiali testati: 845/01, 845/03 e 845/09.

I risultati delle prove di vita con tensione costante sono simili per i tre materiali. Nella Fig. 5.6, infatti, tutti i punti relativi a queste prove sono approssimativamente sulla stessa linea. Le differenze tra i valori dei VEC delle linee di vita delle prove a tensione costante risultano non significative, soprattutto se si tiene conto del fatto che le tre curve di vita sono ottenute da un esiguo numero di punti sperimentali (quattro per l'845/01, tre per l'845/03 e tre per l'845/09).

L'effetto delle inversioni di tensione sulla degradazione dei materiali è evidente confrontando le rispettive curve di vita riportate nella Fig. 5.6. Nel caso dei materiali 845/01 e 845/09 la differenza tra i tempi di scarica ottenuti a tensione costante e quelli ottenuti con inversioni di tensione è circa di un ordine di grandezza. Il materiale 845/03, invece, ha un comportamento considerevolmente diverso. In particolare si vogliono mettere in evidenza due aspetti: 1) i tempi di scarica ottenuti a tensione costante e con inversioni di tensione sono sullo stesso ordine di grandezza; 2) la curva di vita con inversioni è caratterizzata da un VEC particolarmente basso che porta ad avere due situazioni opposte in funzione del valore di campo elettrico: a campi bassi sono inferiori i tempi di scarica ottenuti con inversioni, mentre a campi alti sono inferiori quelli ottenuti senza inversioni.

L'introduzione degli additivi, quindi, non modifica sostanzialmente le prestazioni del materiale a tensione costante, mentre significativi miglioramenti si possono osservare ad alti campi elettrici (nel materiale 845/03), quando si considera l'invecchiamento con inversioni di polarità.



***Figura 5.7***

*Confronto tra i profili del campo elettrico rilevati nei tre materiali testati dopo 40 secondi dall'inversione di tensione.*

Questi risultati potrebbero essere spiegati supponendo una maggiore capacità di drenare cariche del materiale 845/03 rispetto al 845/01 e al 845/09. In questo caso, infatti, questi ultimi

manterrebbero le cariche iniettate durante l'applicazione della tensione per tempi più lunghi, con una inevitabile conseguenza sulla deformazione del campo elettrico all'interno del materiale.

Nel caso delle inversioni di polarità tale fenomeno assumerebbe maggiore importanza. Dopo l'inversione di tensione, infatti, i materiali 845/01 e 845/09 potrebbero presentare una amplificazione del campo interno rispetto all'845/03, che potrebbe essere causa di una accelerazione della degradazione elettrica e quindi della differenza tra i tempi di scarica con e senza inversioni. Queste ipotesi sembrano trovare supporto nelle misurazioni di carica spaziale fino ad ora svolte su questi materiali.

La Figura 5.7, nella quale è indicato l'andamento del campo elettrico nei tre materiali, ottenuto da una prova di PEA a 70 kV/mm 40 secondi dopo l'inversione, mostra che il campo elettrico nel 845/03 si mantiene pressoché costante al valore del campo medio di prova (70 kV/mm), mentre negli altri due materiali il campo è fortemente distorto e in alcuni punti supera il valore medio teorico e quindi il valore presente all'interno del 845/03.

I risultati ottenuti dalle prove di vita, relativi a pochi valori di campo elettrico molto alti, non possono essere certamente utilizzabili per ottenere il valore di progetto del cavo, ma le prove presentate permettono di dare un contributo al confronto delle prestazioni dei materiali in tempi ragionevolmente brevi.

I risultati delle prove di vita appena discussi giustificano l'importanza che, anche nelle prove di PEA, è stato dato all'inversione di polarità. La prova introdotta (par. 4.4.2) è un tentativo per ottenere in tempi brevi la maggior quantità di informazioni utili per il confronto di diversi materiali. Poiché, però, il confronto diretto dei materiali sulla base dei risultati PEA appariva difficoltoso e, comunque, più qualitativo che quantitativo anche utilizzando i diagrammi riassuntivi introdotti per ogni materiale (andamento nel tempo del campo massimo e andamento nel tempo durante la Volt-off della carica accumulata, par. 4.4.2), alcuni nuovi parametri sono stati ulteriormente estrapolati da questi diagrammi. Tali parametri hanno lo scopo di permettere un approccio di tipo completamente nuovo, più semplice ed immediato, ai risultati del PEA e, in particolare, alle prove eseguite con inversione di polarità.

Sono stati scelti sette parametri caratteristici, ottenibili, come detto, dai dati ottenuti nelle prove con inversione di polarità. Le definizioni di questi parametri sono le seguenti:

1) **Pendenza** (*slope*) della caratteristica carica interna-tempo durante la Volt-off; è assunta come indice della rapidità con cui il materiale espelle la carica accumulata.

2) **Carica interna al materiale** (media del valore assoluto della carica netta, eq. (4.1)) al tempo zero della Volt-off; è assunta come indice del valore medio di carica accumulata dal materiale.

3) **Coefficiente di campo massimo** (dato dal rapporto tra il valore assoluto del campo massimo riscontrato nel corso della prova ed il campo elettrico laplaciano applicato). Tale coefficiente indica lo *stress* massimo cui è sottoposto il materiale.

4) **Coefficiente di campo medio massimo totale** (dato dal rapporto tra il valore medio dei valori assoluti dei campi massimi rilevati nel corso dei primi 20000s della prova ed il campo elettrico laplaciano). Tale coefficiente indica lo *stress* medio cui è sottoposto il materiale nel corso della prova.

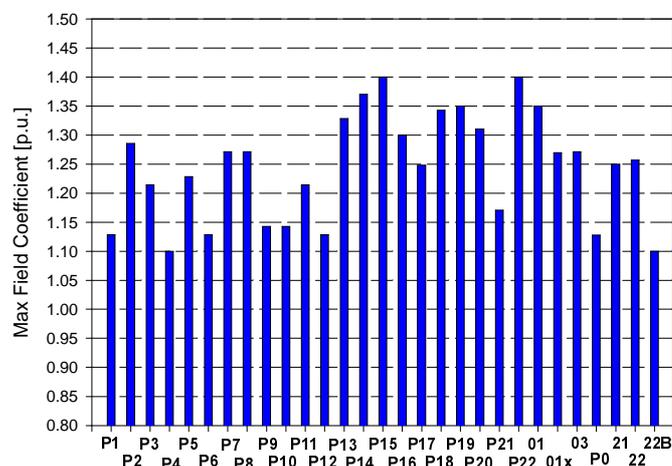
5) **Coefficiente di campo medio massimo positivo** (dato dal rapporto tra il valore medio dei campi massimi rilevati durante i primi 10000s della prova ed il campo elettrico laplaciano).

6) **Coefficiente di campo medio massimo negativo** (dato dal rapporto tra il valore medio dei valori assoluti dei campi massimi rilevati dopo l'inversione di polarità della tensione ed il laplaciano).

Un confronto tra i coefficienti 5) e 6), consente di valutare se il materiale è sottoposto a più o meno stress dopo l'inversione della polarità.

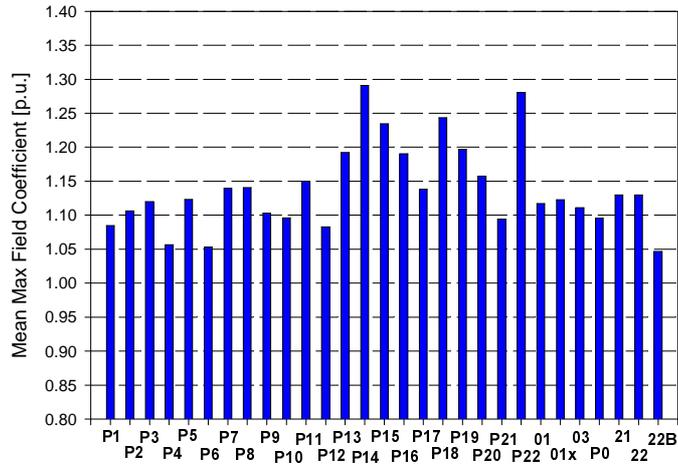
7) **Carica massima** presente all'interno del materiale prima della Volt-off; è assunta come indice del valore massimo di carica accumulata dal materiale.

Le Figg. 5.9-5.15 mostrano i valori dei coefficienti appena definiti, calcolati a partire dai risultati delle prove effettuate (par. 4.4.2) per i diversi materiali in esame.



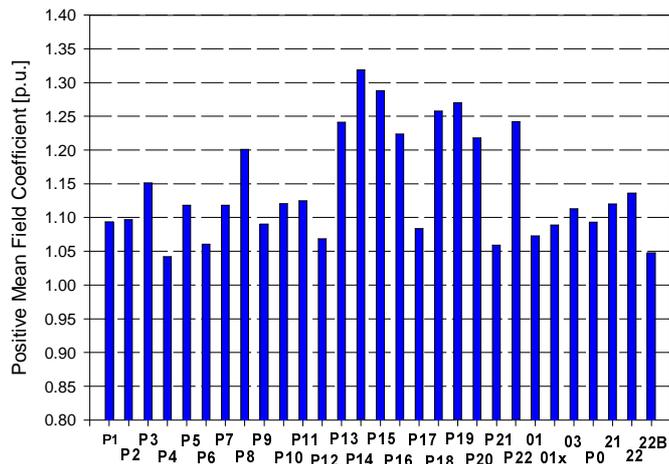
**Figura 5.9**

Diagramma riassuntivo riportante gli indici dello stress massimo cui sono sottoposti i vari materiali.



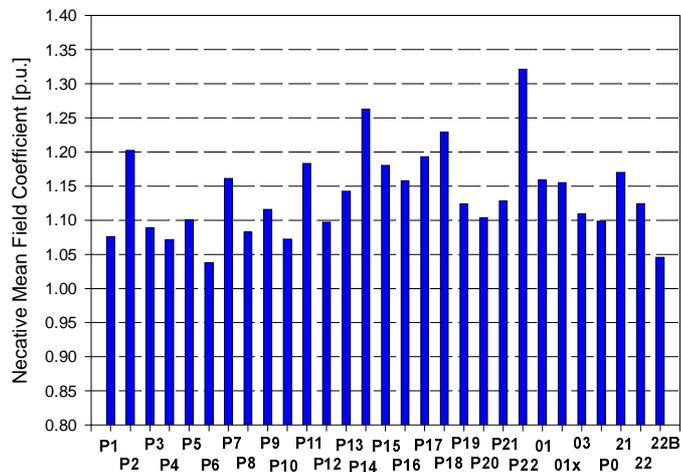
**Figura 5.10**

Diagramma riassuntivo riportante gli indici dello stress medio cui sono sottoposti i vari materiali.



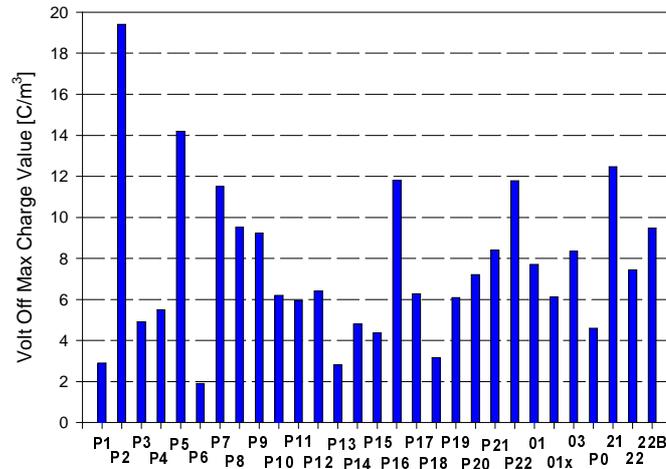
**Figura 5.11**

Diagramma riassuntivo riportante gli indici dello stress medio positivo cui sono sottoposti i vari materiali.



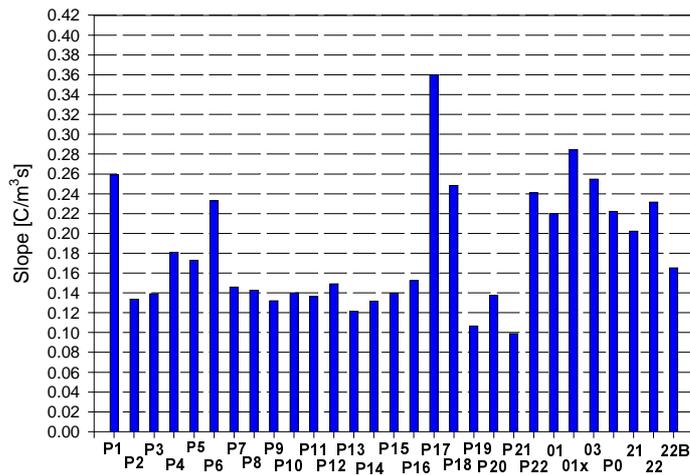
**Figura 5.12**

Diagramma riassuntivo riportante gli indici dello stress medio negativo cui sono sottoposti i vari materiali.



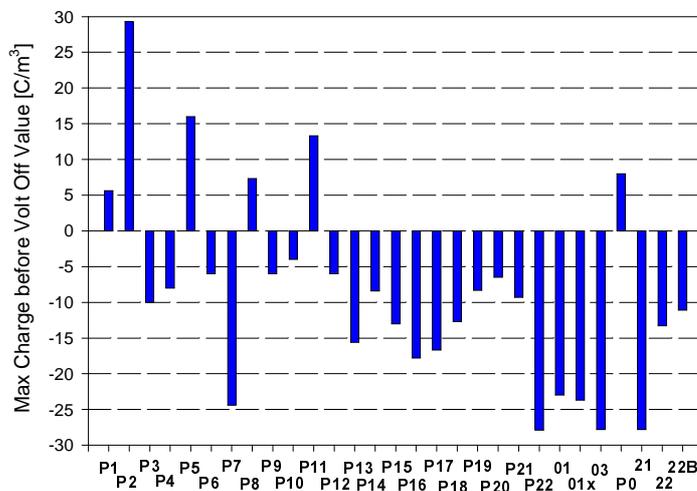
**Figura 5.13**

Diagramma riassuntivo riportante i valori della carica presente all'interno dei materiali testati al tempo zero della volt off.



**Figura 5.14**

Diagramma riassuntivo riportante gli indici della rapidità con cui i materiali espellono carica.



**Figura 5.15**

*Diagramma riassuntivo riportante i valori della carica massima presente nei materiali testati prima della volt off.*

Attraverso questi indici, ed i rispettivi diagrammi, risulta immediato confrontare anche molti materiali, come nel caso qui riportato, senza ricorrere a valutazioni empiriche e soggettive, ma solo sulla base di elementi calcolati. Fissando dei limiti “di accettazione” è, inoltre, possibile selezionare alcuni materiali particolarmente promettenti.

Un esempio di metodologia di selezione basata sul valore dei parametri è di seguito riportato. Il procedimento può essere sviluppato in due fasi: nella prima fase si considerano le informazioni fornite separatamente dai singoli indici che permettono di selezionare un gruppo di materiali diverso per ogni coefficiente. Nella seconda fase si confrontano i diversi gruppi così ottenuti selezionandone gli elementi comuni. La Fig. 5.9 mostra il confronto tra i valori del coefficiente di campo massimo; si selezionano i materiali che presentano un incremento inferiore al 15% del campo laplaciano. I materiali che rispettano tale condizione sono quelli contrassegnati dalle sigle: P0, P1, P4, P6, P9, P10, P12 e 22B. La Fig. 5.10 mostra il confronto tra i valori del coefficiente di campo massimo totale medio; si selezionano i materiali che presentano un incremento inferiore al 10% del campo laplaciano. I materiali che rispettano tale condizione sono: P0, P1, P4, P6, P10, P12, P21 e 22B. La Fig. 5.11 mostra il confronto tra i valori del coefficiente di campo massimo positivo medio; si selezionano i materiali che presentano un incremento inferiore al 10% del campo laplaciano. I materiali che rispettano tale condizione sono: P1, P2, P4, P6, P9, P12, P17, P21, 01, 01x, P0 e 22B. La Fig. 5.12 mostra il confronto tra i valori del coefficiente di campo massimo negativo medio; si selezionano i materiali che presentano un incremento inferiore al 10% del campo elettrico laplaciano. I materiali che rispettano tale condizione sono quelli contrassegnati dalle sigle: P1, P3, P4, P6, P8, P10, P12, P0 e 22B. La Fig. 5.13 mostra il confronto tra i valori della carica elettrica all'interno del materiale (in valore assoluto) all'inizio della Volt-off; si selezionano i materiali che presentano un valore di carica elettrica inferiore a  $5C/m^3$ . I materiali che rispettano tale condizione sono: P0, P1, P3, P6, P13, P14, P15 e P18.

La Fig. 5.14 mostra il confronto tra i valori della pendenza della caratteristica carica – tempo; si selezionano i materiali che presentano una pendenza superiore a  $0.16C/m^3s$ . I materiali che rispettano tale condizione sono: P0, P1, P4, P5, P6, P17, P18, P22, 01, 01x, 21, 22 e 22B. La Fig. 5.15, infine, mostra il confronto tra i valori della carica elettrica massima all'interno del materiale prima della Volt-off; si selezionano i materiali che presentano un valore di carica

elettrica inferiore a  $6C/m^3$ . I materiali che rispettano tale condizione sono: P1, P6, P9, P10, P12 e P20. In conclusione, i materiali che rispondono a tutte alle condizioni citate in precedenza sono quelli identificati dai seguenti codici: P1, P4, P6, P10, P12 e 22B. Tutti questi materiali presentano, quindi, un basso valore del campo massimo totale, del campo massimo medio ed un ottimo comportamento sia prima sia dopo l'inversione di polarità della tensione e sono quindi, potenzialmente, i migliori candidati tra i materiali esaminati.

Quest'esempio mostra che i parametri introdotti consentono di valutare con facilità e rapidamente la qualità dei materiali isolanti in prova. Forniscono, quindi, un utile strumento per una rapida retroazione tra caratterizzazione e produzione del materiale.

## *Capitolo VI*

# *Conclusioni*

---

Lo scopo principale di questo lavoro di tesi era l'introduzione di nuove metodologie per la caratterizzazione di materiali isolanti polimerici, da utilizzare in applicazioni HVDC. I dati riportati e la discussione ad essi inerente consentono di poter affermare che la metodologia proposta, basata su prove di breve durata (PEA, conducibilità e prove di vita ad alti campi con e senza inversioni di polarità), permette effettivamente una rapida caratterizzazione di numerosi materiali contemporaneamente. Il principale vantaggio di questa metodologia è l'eliminazione delle prove di vita a lunga durata che impediscono qualunque retroazione tra chi caratterizza il materiale e chi, invece, lo progetta e necessita di rapide indicazioni sulle linee da seguire.

L'introduzione di nuovi parametri, come la soglia di intrappolamento, ottenuti dalle prove di conducibilità e dalle prove di PEA, consente di poter dare un giudizio rapido e quantitativo sulla reale efficacia di un additivo e quindi di confrontare tra loro un elevato numero di materiali.

In relazione alla soglia di intrappolamento si vuole sottolineare, in particolare, come i risultati abbiano evidenziato una forte correlazione tra quella ottenuta con il PEA e quella ottenuta con le misure di conducibilità solo per il materiale non additivato. Ciò significa che gli additivi producono, nel materiale, delle modifiche nei meccanismi di conduzione e di intrappolamento, che provocano effetti diversi nelle due tecniche di indagine. Per questo motivo si ritiene necessario utilizzare entrambe le tecniche di prova per la determinazione di questo importante parametro.

Relativamente all'effetto, confermato dalle prove di vita, dell'inversione di polarità sul materiale, si vuol sottolineare la potenzialità del protocollo di prova PEA qui standardizzato, che consente l'introduzione di parametri legati a diverse caratteristiche del materiale in esame. Tali parametri consentono, ancora una volta, di valutare rapidamente la qualità dei materiali isolanti in prova e forniscono un utile strumento comparativo.

Un'ultima considerazione sulle prove svolte riguarda l'interpretazione dei risultati ottenuti dalle singole prove. I dati riportati in questa tesi dimostrano che solo confrontando diverse tecniche di prova si può avere un quadro completo del materiale che si sta esaminando. Un

esempio eclatante, qui riportato, è quello relativo alla conduzione del materiale di riferimento (XLPE 845/01): il confronto tra prove di conduzione e prove di PEA ha consentito di chiarire il meccanismo di conduzione in tale materiale e ha portato ad ipotizzare un nuovo modello di conduzione assistita dalla carica spaziale.

Lo sviluppo della metodologia proposta è quindi di sicuro interesse, anche dal punto di vista dell'applicazione industriale. In particolare, la possibilità futura di eseguire prove di PEA a valori di campo elettrico simili a quelli utilizzati nelle prove di vita, consentirà probabilmente di trovare il legame tra i valori dei parametri introdotti nelle prove PEA e la vita del materiale.

## *Sommario*

---

Il recente sviluppo di sistemi per la trasmissione dell'energia in corrente continua ha fortemente accresciuto l'interesse verso la possibile realizzazione di cavi per alta tensione continua con isolamento polimerico. L'attenzione su questo settore è certamente alta, sia dal punto di vista scientifico sia da quello prettamente industriale. Crescenti interessi economici, infatti, spingono le aziende produttrici verso la realizzazione di cavi per media ed alta tensione DC con isolante estruso, in sostituzione del tradizionale isolamento in carta e olio. Nonostante i notevoli investimenti in gioco, però, i risultati raggiunti finora non sono soddisfacenti a causa del comportamento che i materiali polimerici presentano quando sono sottoposti a tale tipo di sollecitazione elettrica. In queste condizioni, infatti, i materiali normalmente utilizzati nelle applicazioni AC presentano un invecchiamento più rapido rispetto ai materiali convenzionali. Le ricerche svolte in questo settore hanno concordato nell'affermare che una delle principali cause di tale decadimento di prestazioni è l'accumulo di cariche elettriche all'interno del materiale. Queste, causando una deformazione nell'andamento del campo elettrico, producono 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. In aggiunta a questa descrizione macroscopica, attualmente si stanno sviluppando nuove teorie sul legame tra carica intrappolata ed invecchiamento che ipotizzano un effetto dovuto all'accumulo di energia aggiuntiva nei siti di intrappolamento. Quest'energia altera la velocità delle reazioni riducendo la barriera di energia libera alla degradazione e favorendo, così, la formazione di microcavità (che risultano essere il punto debole dove i "tradizionali" fenomeni legati all'invecchiamento si manifestano).

La via intrapresa per risolvere questo problema è quella di modificare il materiale base, generalmente XLPE, aggiungendo degli additivi appropriati in grado di rendere il materiale più resistente al fenomeno suddetto. Per ottenere risultati in questa direzione è necessario avere delle rapide indicazioni sulla reale efficacia di un additivo e quindi sulle scelte da prendere nello sviluppo del miglioramento del materiale. A tal fine sono richieste nuove tecniche di qualificazione dei materiali che rendano effettivamente praticabile una rapida retroazione sui produttori.

Risulta così evidente come un'approfondita ricerca sull'argomento possa avere importanti ripercussioni anche nel settore industriale, oltre a presentare un indubbio interesse dal punto di vista della conoscenza scientifica.

Data la notevole importanza rivestita dalla presenza delle cariche spaziali in relazione al comportamento che il materiale assume in condizioni di sollecitazione elettrica DC, una delle priorità del progetto di ricerca è stata quella di realizzare un sistema per la misura diretta di tale carica. Questa parte del lavoro ha portato alla realizzazione di un sistema PEA (dall'inglese Pulse ElectroAcoustic method). Il PEA è un metodo per la misura della carica spaziale nel quale la carica è valutata sulla base dell'azione meccanica che essa esercita nei confronti della struttura reticolare del materiale, quando in esso viene iniettato un impulso elettrico. La conseguente reazione del reticolo si traduce in un'onda acustica, che viene poi trasformata in un segnale elettrico da un trasduttore piezoelettrico. Determinata in questo modo la distribuzione della carica, per via numerica si ricava quella del campo elettrico. A tale scopo il sistema di misura è stato interfacciato con un PC e si è realizzato un software per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati. Il sistema è attualmente in grado di investigare il comportamento della carica spaziale fino a tensioni applicate pari a 15 kV, corrispondenti a campi elettrici superiori a 100kV/mm (nei campioni normalmente utilizzati aventi spessori variabili da 0.1 a 0.15 mm).

I dati ottenuti mostrano come a bassi valori di campo elettrico (laplaciano) non si osservi all'interno del campione alcun accumulo di carica (il profilo di carica rimane immutato durante tutto il periodo di applicazione del campo di prova) e come, al contrario, a valori più alti di campo tale accumulo diventi assai rilevante, provocando una forte deformazione del campo elettrico reale con amplificazioni superiori al 10% del laplaciano. Queste osservazioni hanno reso possibile supporre l'esistenza di un campo limite (o di soglia) al di sopra del quale inizia l'intrappolamento.

La metodologia proposta per la caratterizzazione rapida e per il confronto di diversi materiali prevede, oltre alle misure di PEA, anche misure più tradizionali quali:

- Prove di rigidità dielettrica DC
- Prove di vita elettrica a breve termine con campo DC (con e senza inversioni di polarità)
- Misure di conducibilità ad alti campi

Si può sottolineare che, anche se tra le prove sono indicate quelle di vita, si tratta di prove eseguite a campi tali da ridurre la durata a tempi dell'ordine di qualche settimana. Uno degli scopi dell'intero progetto era, infatti, quello di integrare le informazioni ottenibili da varie tecniche di indagine allo scopo di evitare prove di vita a lungo e lunghissimo termine, richieste invece nelle metodologie classiche di caratterizzazione. Le prove di vita sono state svolte anche con inversione di polarità, essendo questa una condizione più gravosa di sollecitazione che nei sistemi reali sembra dare origine ad intollerabili riduzioni della vita.

Le prove di conducibilità ad alti campi sono state utilizzate per indagare il tipo di conduzione prevalente nei materiali e, soprattutto, per ottenere le caratteristiche densità di corrente-campo elettrico. Queste caratteristiche sono utili per individuare, in abbinamento alle prove PEA, le eventuali soglie di campo elettrico al di sotto delle quali non si ha un intrappolamento della carica all'interno del materiale. Questo approccio ha portato alla determinazione, in molti casi, di un legame tra le soglie ottenibili con i due diversi tipi di prova.

Sempre nell'ottica di ottenere delle rapide informazioni sul comportamento dei materiali ed un loro confronto non solo qualitativo (come generalmente viene fatto) ma anche quantitativo, si è standardizzato un protocollo di prova PEA. Esso permette non solo di ottenere le curve di carica e campo ma anche parametri numerici utilizzabili per un più rapido ed oggettivo confronto. Il vantaggio di tali parametri è anche quello di permettere una trattazione statistica che può dare informazioni più complete sul comportamento di un dato materiale e permettere, mediante tecniche di analisi derivanti dal DOE (Design Of Experiment), di correlare le informazioni ottenute dal PEA con quelle ottenute dalle prove di vita con e senza inversioni.

La tesi presentata si inserisce in questo settore di ricerca introducendo delle nuove metodologie per la caratterizzazione dei materiali polimerici, che rendono effettivamente praticabile una rapida retroazione sui produttori. In particolare la tesi propone l'integrazione di prove tradizionali con misure di carica spaziale.

Nell'introduzione della tesi sono descritte le problematiche relative all'utilizzo dei materiali polimerici nei cavi per alte tensioni continue e le motivazioni che, comunque, spingono le aziende produttrici al loro impiego.

Nel primo capitolo sono riassunti i principali aspetti teorici relativi all'argomento in oggetto e sono introdotte le principali caratteristiche dei materiali polimerici. Particolare attenzione è prestata al concetto di carica intrappolata e alle teorie sull'interpretazione dei processi di

formazione e trasporto della carica. Sono infine descritti il fenomeno della scarica nei dielettrici e quello dell'invecchiamento dovuti al campo elettrico.

Il secondo capitolo è dedicato alla descrizione delle metodologie e delle apparecchiature utilizzate per la realizzazione delle prove svolte durante il lavoro. In particolare l'attenzione è concentrata sulle metodologie più note, come la misura della conducibilità elettrica, la misura della rigidità dielettrica e lo svolgimento delle prove di vita. In questo capitolo sono anche introdotti i concetti di statistica utilizzati per l'elaborazione dei dati ottenuti con le suddette prove.

Nel terzo capitolo è invece descritta, con particolare attenzione, l'innovativa metodologia utilizzata per la misura della carica spaziale. Essa si basa sul metodo dell'impulso elettroacustico (PEA). Nel capitolo sono quindi descritti i fondamenti teorici su cui tale metodo si basa ed è anche riportata un'approfondita descrizione della cella PEA costruita ed utilizzata durante la ricerca.

Il quarto ed il quinto capitolo sono dedicati all'esposizione e alla discussione dei dati sperimentali ottenuti. In particolare nel quarto capitolo sono riportati i dati relativi ad ognuna delle tecniche utilizzate mentre nel quinto capitolo è riportata la discussione di tali dati con l'introduzione di nuovi parametri che permettono il confronto rapido dei diversi materiali esaminati.

Il sesto ed ultimo capitolo contiene, infine, le considerazioni conclusive tratte dai risultati ottenuti. In esse è particolarmente evidenziata la potenzialità della metodologia proposta.

# ***Bibliografia***

---

- [1] BICC Cables, *Electric cables Handbook*, Blackwell Science Editor.
- [2] M. Jeroense, “Charges and Discharges in HVDC Cables” Tesi di dottorato, Università di Delft, Olanda, 1997.
- [3] M.Salah Khalil, “High Voltage direct current cables with polymeric insulation: the state of the art”, NORD-IS 92, Vasteras, 15-17 giugno 1992.
- [4] M.Salah Khalil, “International Research and Development Trends and Problems of HVDC Cables with Polymeric Insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, N. 6, pp. 35-47 November/December 1997.
- [5] T. Tanaka, A. Greenwood, *Advanced Power Cable Technology*, Vol. II, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1983.
- [6] N. Ando, F. Numajiri, K. Tomori, K. Muraki, T. Kumagai, “Development of  $\pm 250$  kV DC Crosslinked Polyethylene Cable, Hitachi Review, Vol. 25, N. 10, pp. 355-360, 1976.
- [7] Y. Zhang, J. Lewiner, C. Alquiè, N. Hampton, “Endurance of strong correlation between space charge build up and breakdown in cable insulation”, IEEE. Trans. on DEIS, Vol. 3, N. 6, dicembre 1996.
- [8] T. Tanaka, A. Greenwood, *Advanced Power Cable Technology*, Vol. I, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1983.
- [9] F. H. Kreuger, *Industrial High DC Voltage*, Delft University Press, Delft, Olanda, 1995.
- [10] B. Sanden, *XLPE Cable insulation subjected to HVDC stress*, Tesi di dottorato, NTNU Trondheim, 1996.
- [11] F. Stucki, “Injection of a Minimal Space Charge as Mechanism for the Initial Phase of Electrical Polymer degradation”, IEEE Trans. Dielectrics & Electr. Insul., Vol. 1, N. 2, pp. 231-234, April 1994.
- [12] L. A. Dissado, G. Mazzanti, G.C. Montanari, “The Incorporation of Space Charge Degradation in the Life Model for Electrical Insulating Materials”, IEEE Trans. Dielectrics & Electr. Insul., Vol. 2, N. 6, pp. 1147-1158, Dicembre 1995.
- [13] Y. Zhang, J. Lewiner, C. Alquiè, N. Hampton, “Evidence of strong correlation between space-charge build up and breakdown in cable insulation”, IEEE Trans. on DEI, Vol. 3, N. 6, pp. 778-783, dicembre 1996.
- [14] G. C. Montanari, G. Mazzanti, L. Dissado, D. Das Gupta, “Space Charge as a Trigger for Electrical Ageing of Polymeric Insulation”, in *Space Charges in Solid Dielectrics*, The Dielectric Society Ed., 1998.

- [15] L. A. Dissado, G. Mazzanti, G.C. Montanari, "The role of trapped Space charge in the Electrical Aging of Insulating Materials", IEEE Trans. Dielectrics & Electr. Insul., Vol. 2, N. 5, pp. 496-506, ottobre 1997.
- [16] B. S. Hansem, *High Voltage Direct Current Cable with Solid Insulation*, Final Report, Electrical Power Engineering Dept., Technical University of Denmark, August 1983.
- [17] R. Coelho, B. Aladenize, F. Guillaumont, "Charge Buildup in Lossy Dielectrics with Induced Inhomogeneities", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4 N. 5, pp. 477-486, Ottobre 1997.
- [18] T. Tanaka, "Charge Injection by Voltage Application into Polymer Dielectrics-New Proposal for DC Cable Polymer Insulation System", IEEE PES Summer Meeting, Portland, OR, 18-23 July 1976.
- [19] Y. Suzuoki, H. Muto, T. Mizutani, M. Ieda, "Effects of space charge on electrical conduction in high-density polyethylene", J. Phys. D: Appl. Phys, N. 18, pp. 2293-2302, 1985.
- [20] A. Cherifi, M. Salah Khalil, C. Meaner, J-P. Rebel, A. Toureille, "Influence of Polarizing Electrode Material on Space Charge Storage in Low Density Polyethylene", 8<sup>th</sup> International Symposium on Electrets, pp. 224-229, Paris, France, 7-9 September 1994.
- [21] R. Patsch, "Space charge phenomena in polyethylene at high electric fields", J. Phys. D: Appl. Phys, N. 23, pp. 1497-1505, 1990.
- [22] H. Kon, T. Mizutani, Y. Suzuoki, H. Shigetugu, "High-Field Conduction and Space Charge in Polyethylene", CEIDP 94, pp.268-273, ottobre 1994.
- [23] K. Terashima, M. Hara, H. Suzuki, K. Watanabe, "Research and Development of  $\pm 250$  kV DC XLPE Cables", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13 N. 1, pp. 7-15, gennaio 1998.
- [24] T. Takeda, N. Hozumi, M. Hara, Y. Murata, K. Fujii, K. Terashima, K. Watanabe, M. Yoshida, "Space Charge Behavior in Full-Size 250 kV DC XLPE Cables", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13 N. 1, pp. 28-39, gennaio 1998.
- [25] N. Hozumi, T. Takeda, H. Suzuki T. Okamoto, "Space Charge Behavior in XLPE Cable Insulation under 0.2-1.2 MV/cm DC Fields", IEEE Trans. Dielectrics & Electr. Insul., Vol. 5, N. 1, pp. 82-90, febbraio 1998.
- [26] K. R. Bambery, R. J. Fleming, "Space Charge Accumulation in Two Power Cable Grades of XLPE", IEEE Trans. Dielectrics & Electr. Insul., Vol. 5, N. 1, pp. 103-109, febbraio 1997.
- [27] M. Abau-Dakka, A. Bulinski, S. Bamji, "Space Charge Evolution in XLPE and EPR under High Uniform Electric Fields, CEIDP 98, pp. 136-139, Atalanta, USA, Ottobre 1998.
- [28] M. Fukuma, M. Nagao, M. Kosaki, Y. Kohno, "Simultaneous Measurements of Space Charge Distribution and External Circuit Current up to Electrical Breakdown in LDPE Film", CEIDP 98, pp. 144-147, Atlanta, USA, Ottobre 1998.

- [29] G. C. Montanari, L. Simoni, "Aging Phenomenology and Modeling", IEEE Trans. On Electr. Insul., Vol. 28, pp. 755-776, 1993.
- [30] G. C. Montanari, "Electrical Life Threshold Models for Solid Insulating Materials Subjected to Electrical and Multiple Stresses. Investigation and Comparison of Life Models", IEEE Trans. On Electr. Insul., Vol. 28, pp. 755-776, 1993.
- [31] G. C. Montanari, I. Ghinello, A. Motori, S. Gubanski, D. Das Gupta, "Searching for Short-term Techniques for the Inference of Electrical Threshold of PET", IEEE Trans. on Diel. & Electr. Insul., Vol. 5, N. 1, pp. 148-153, febbraio 1998.
- [32] G. C. Montanari, I. Ghinello, A. Motori, S. Gubanski, D. DasGupta, "High-Field Conductivity Measurements and Search for Threshold in PET Films ", IEEE CEIDP 96, pp. 20-23, S. Francisco, USA, 20-23 ottobre 1996.
- [33] G. C. Montanari, I. Ghinello, "Space charge and electrical conduction-current measurements for the inference of electrical degradation threshold", CSC 3, Tourse, France, 29 giugno-3 luglio 1998.
- [34] M. Albertini, F. Peruzzotti, I. Ghinello, G. C. Montanari, S. Bambi, A. Motori, "Investigation of space charge and conduction current in additivated XLPE", CSC'3, pp.620-623, Tours, France, 29 giugno-3 luglio 1998.
- [35] G.C Montanari, I Ghinello, F. Peruzzotti, M. Albertini, "Endurance characteristics of XLPE compounds under DC voltage", ICSD'98, pp.439-442, Vasteras, Svezia, 22-25 giugno 1998.
- [36] G.C Montanari, I Ghinello, F. Peruzzotti, M. Albertini, "Behavior of voltage-current characteristics and threshold indications for XLPE-based Materials", CEIDP'98, pp.128-130, Atlanta, USA, ottobre 1998.
- [37] F. Peruzzotti, M. Albertini, L. Martinotto, I Ghinello, G. C Montanari, "An investigation on performance of XLPE compounds for high-voltage DC application", ISEIM'98, pp.475-478, Toyohashi, Giappone, 27-30 settembre 1998.
- [38] W. Hayden, W. G. Moffat, J. Wulf, *Struttura e proprietà dei materiali – Vol. 3*, CEA Milano, 1975.
- [39] N. G. McCrum, C.P. Buckley, C. B. Bucknall, *Principles of polymer engineering*, Oxford University Press, Oxford, 1988.
- [40] T. W. Graham Solomon, *Chimica organica*, Editoriale Grasso, Bologna, 1988.
- [41] R. M. Rose, J. Wulff, L. A. Shepard, *Struttura e proprietà dei materiali – Vol. 4*, CEA Milano, 1975.
- [42] P. Chiorboli, *Fondamenti di chimica*, UTET, Torino, 1987.
- [43] D. A. Seanor, *Electrical Properties of Polymers*, Academic Press, Inc., London, 1982.

- [44] F. Sandrolini, "Proprietà elettriche dei polimeri", atti delle giornate di studio AIM, Bologna, 1-2 marzo 1984.
- [45] M. Ieda, "Electrical conduction and carrier traps in polymeric materials", IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. 19, N. 3, pp. 162-178, giugno 1984.
- [46] P. Fischer, P. Rohl, "Transient current in oxidized low-density polyethylene", Progr. Colloid & Polymer Sci., Vol. 62, pp. 149-153, 1977.
- [47] P. Röhl, "*Electronic Hopping Transport Mechanism in Polyethylene*", IEEE ISEI, pp.186-189, Montreal, Canada, 11-13 giugno 1984.
- [48] L. E. Amborski, "Structural Dependence of the Electrical Conductivity of Polyethylene Terephthalate", J. Polym. Sci., Vol. 62, pp.331-346, 1962.
- [49] E. Sacher, "The DC Conductivity of Poly(ethylene terephthalate) at Elevated Temperatures", J.Phys.D., Vol. 5, pp.L17-L18, 1972.
- [50] D. K. Davies, "Carrier transport in polythene", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 5, 1972.
- [51] K. Kamisako, S. Akiyama, K. Shinohara, "Electrical conduction of polystyrene films", Jpn. Journ. of Appl. Phys., Vol. 13, N. 11, pp. 1780-1786, novembre 1974.
- [52] D. Das Gupta, K. Joyner, "On the nature of absorption currents in polyethylene terephthalate (PET)", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9, pp. 829-840, 1976.
- [53] D. Das Gupta, K. Joyner, "A study of absorption currents in polypropylene", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9, pp. 2041-2047, 1976.
- [54] D. Das Gupta, R. S. Brockley, "A study of absorption currents in low-density polyethylene", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 11, pp. 955-961, 1978.
- [55] T. Mizutani, M. Ieda, I. B. Jordan, "Anomalous Transient Currents in High-Density Polyethylene around 50-70°C", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 18, N. 1, pp.65-70, gennaio 1979.
- [56] T. Mizutani, M. Ieda, "Carrier Transport in High-Density Polyethylene", J. Phys. D. Appl. Phys., Vol. 12, pp.291-296, 1979.
- [57] K. Miyairi, M. Ieda, "Current Peaks Observed in Polyethylene Terephthalate Films with Linearly Increasing Voltage", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 19, pp.1067-1071, 1980.
- [58] D. Das Gupta, K. Doughty, R. S. Brockley, "Charging and discharging currents in polyvinylidene fluoride", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 13, pp. 2101-2114, 1980.
- [59] T. Mizutani, T. Tsukahara, M. Ieda, "The Effects of Oxidation on the Electrical Conduction of Polyethylene", J. Phys. D., Vol. 13, pp.1673-1679, 1980.
- [60] M. Onoda, H. Nakayama, K. Amakawa, "Transient Current Peak on Plasticized Polyvinylchloride Containing Adsorbed Water", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 20, N. 5, pp.861-866, maggio 1981.

- [61] A. E. Vlastos, "Temperature and Field Dependence of DC Leakage Currents of XLPE Cables", ICPADM, 2, 85-CH2115-4, pp.517-520, 1985.
- [62] K. Iida, H. Ishiguro, S. Nakamura, M. Ieda, G. Sawa, "Current Peaks Following Voltage Reversal in Chlorinated Polyethylene", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 24, pp.666-668, 1985.
- [63] G. M. Sessler, B. Hahn, Y. Yoon, "Electrical conduction in polyimide films", Jour. Appl. Phys., Vol. 60, N. 1, pp.318-326, 1986.
- [64] V. Adamec, J. H. Calderwood, "Charging Phenomena and SCL Regime in Polymeric Dielectrics", IEEE Trans. on El. Ins., Vol. 21, N. 3, pp.389-393, giugno 1986.
- [65] K. Miyairi, Y. Otha, M. Ieda, "The Compensation Law in Electric Conduction and Dielectric Relaxation for Polyvinyl Chloride", J. Phys. D., Vol. 21, pp.1519-1523, 1988.
- [66] S. Péliou, H. St-Onge, M. R. Wertheimer, "Electrical Conduction of Polyethylene Below and Above its Melting Point", IEEE Trans. on El. Ins., Vol. 23, pp.325-333, 1988.
- [67] A. E. Vlastos, "DC Conduction of Polymeric Insulation of Medium Voltage Cables", ICSD, pp.287-293, 1989.
- [68] G. Chen, H. M. Banford, R. A. Fouracre, D. J. Tedford, "Electrical Conduction in Low-Density Polyethylene", ICSD, pp.277-281, 1989.
- [69] J. P. Crine, "Origin and Significance of the Compensation Law in Electrical Conduction and Dielectric Relaxation of Plasticized PVC", J. Phys. D., Vol. 23, pp.1315-1319, 1990.
- [70] Y. Ohki, K. Ohishi, T. Takeda, Y. Tanaka, "Conduction Current in Polyether-Ether-Ketone", CEIDP, pp.74-80, ottobre 1992.
- [71] M. A. Sussi, G. R. Govinda Raju, "Conduction Currents in Composite Aromatic Polyamide Insulation", CEIDP, pp.156-161, ottobre 1993.
- [72] K. S. Suh, C. R. Lee, J. S. Noh, J. Tanaka, D. H. Damon, "Electrical Conduction in Polyethylene with Semiconductive Electrodes", IEEE Trans. on Diel. and El. Ins., Vol. 2, pp.224-230, 1994.
- [73] G. C. Montanari, I. Ghinello, A. Motori, D. DasGupta, "An investigation of conduction mechanisms at High-Field in PET", IEEE CEIDP 97, pp. 451-454, Minneapolis, USA, 19-22 ottobre 1997.
- [74] A. Many, G. Rakavy, "Theory of Transient Space-Charge-Limited Current in Solids in the Presence of Trapping", Phys. Rev., Vol. 126, pp.1980-1988, 1962.
- [75] L. Simoni, "*Dielettrici, proprietà e comportamento nel tempo*", CLUEB, Bologna, 1974.
- [76] L. Simoni, "*Resistenza alle sollecitazioni dei materiali isolanti elettrici*", CLUEB, Bologna, 1994.
- [77] L. Simoni, "*Proprietà dielettriche e scarica dei materiali isolanti elettrici*", CLUEB, Bologna, 1996

- [78] G. Marrone, P. Nicolini, A. Motori, F. Sandrolini, "Laboratory measuring techniques applied to check insulating materials and interfaces composite insulators", 34<sup>th</sup> CIGRE, Paris, France, 30 agosto- 7 settembre 1992.
- [79] L. F. Zauli Sajani, *Confronto di metodi statistici per la stima dei parametri della funzione di probabilità di Weibull*, Tesi di laurea, Università di Bologna, A.A. 1993/94
- [80] M. Cacciari, G. Mazzanti, G.C. Montanari, "Comparison of maximum likelihood unbiasing methods for the estimation of the Weibull function", IEEE Trans. on DEI, Vol. 3, N. 1, pp. 18-27, febbraio 1996
- [81] G.C. Montanari, G. Mazzanti, M. Cacciari, J.C. Fothergill, "Optimum estimators for the Weibull distribution for data from censored tests. Part 1: singly-censored tests", Proposto per la pubblicazione su IEEE Trans. DEI, 1997.
- [82] G.C. Montanari, G. Mazzanti, M. Cacciari, J.C. Fothergill, "Optimum estimators for the Weibull distribution for data from censored tests. Part 2: progressively-censored tests ", Proposto per la pubblicazione su IEEE Trans. DEI, 1997.
- [83] J.F. Lawless, *Statistical models and methods for lifetime data*, WILEY, 1982
- [84] J.S. White, "The moments of log-Weibull order statistics", Technometrics, Vol. 11, N. 2, pp. 374-386, Maggio 1969.
- [85] F. Gasparini, G. Zingales, "Sul funzionamento dei moltiplicatori di tensione a raddrizzatori e condensatori", L'Elettrotecnica, Vol. XLVI, N. 11, pp. 742-753, novembre 1959.
- [86] N. H. Ahmed, N. Srinivas, "Review of space charge measurements in dielectrics", IEEE Tran. on DEI, Vol. 4, N. 5, pp. 644-656, ottobre 1997.
- [87] T. Takada, T. Mizutani, T. Tanaka, N. Hozumi, "New direct observation technique for electric charge behavior in insulating materials and its application to power cables", CIGRE' 98, Parigi 1998.
- [88] R. E. Collins, "Measurement of charge distribution in electrodes", Rev. Sci. Instrum., Vol. 48, N. 1, pp. 83-91, 1977.
- [89] A. S. DeReggi, C. M. Guttman, F. I. Mopsik, G. T. Davis, M. G. Broadhurst, "Determination of charge or polarization distribution across polymer electrets by the thermal Pulse Method and Fourier Analysis", Phys. Rev. Lett., Vol. 40, pp. 4333-4339, 1982.
- [90] S. B. Lang, D. K. DasGupta, "laser Intensity modulation Method: a technique for determination of spatial distribution of polarization and space charge in polymer electrets", J. Appl. Phys., Vol. 59, pp. 2151-2160, 1960.
- [91] A. Cherifi, M Abou Dakka, A. Toureille, "The validation of the Thermal Step Method", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 27, N. 6, pp. 1152-1158, giugno 1992.

- [92] W. Eisenmenger, M. Haardt, "Observation of charge compensated polarization zones in PVDF film by Piezoelectric Acoustic Step Wave Response", *Solid. State Commun.*, Vol. 41, pp. 917-920, 1982.
- [93] G. M. Sessler, J. E. West, G. Gerhard, "High resolution laser pulse method for measuring charge distributions in dielectrics", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 48, N. 8, pp. 563-566, 1982.
- [94] Y. Li, *Space charge measurement in lossy solid dielectric materials by pulsed ElectroAcoustic method*, Tesi di Ph.D., Musashi Institute of Technology, Tokyo, 1994.
- [95] Y. Li, M. Yasuda, T. Takada, "Pulse ElectroAcoustic method for measurement of charge accumulation in solid dielectrics", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 1, N. 2, pp. 188-195, 1994.
- [96] T. Takada, T. Sakai, "Measurements of electric fields at a dielectric/electrodes interface using an acoustic transducer technique", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 18, pp. 619-628, 1983.
- [97] J. Alison, "A high field pulsed electro-acoustic apparatus for space charge and external circuit current measurement within solid insulators", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 1737-1750, 1998.
- [98] Comunicazioni personali del Dr. J. M. Alison, King's College, London.
- [99] C. M. Cook, "Space-charge difference method: calibration and near surface charges", *CIGRE'97*, Bedford, MA, USA.
- [100] N. Adachi, X. Qin, Y. Tanaka, T. Takada, "Comparison between the PEA method and the PWP method for measuring space charge distribution in solid insulation", *ISEIM98*, pp. 227-230, Toyohashi, Japan, 27-30 settembre 1998.
- [101] D. Zanobetti, M. Pezzi, *Lezioni di impianti elettrici*, CLUEB, Bologna 1981.