

Capitolo IV

Risultati sperimentali

Durante lo svolgimento del lavoro di tesi sono state studiate le caratteristiche di diversi tipi di materiali isolanti solidi ottenuti da un'identica base di XLPE con l'aggiunta di differenti additivi. I risultati ottenuti non sono direttamente utilizzabili per la progettazione dell'isolamento di un cavo in corrente continua, ma servono per dare indicazioni sulle caratteristiche dei materiali e, soprattutto, per illustrare una metodologia complessiva utile alla loro rapida qualificazione. La metodologia proposta permette, confrontando diverse caratteristiche dei materiali esaminati, di selezionare quelli che appaiono più adatti all'utilizzazione in condizioni HVDC. I materiali selezionati saranno poi presi in considerazione per sviluppare modelli di cavo da utilizzare in studi successivi.

Il materiale di riferimento (che sarà indicato nel seguito con la sigla 845/01) è, come detto, costituito da polietilene reticolato "puro". I restanti materiali sono stati ottenuti mediante additivazione del materiale base con diversi composti sia organici sia inorganici; ogni materiale sarà in seguito indicato con un proprio codice (non è stato possibile menzionare gli additivi utilizzati). Il gran numero di materiali così ottenuti ha reso indispensabile l'introduzione di una nuova metodologia di prova, che permettesse di qualificare e confrontare rapidamente le proprietà di tali materiali. A tale scopo sono state utilizzate contemporaneamente diverse tecniche di prova (come riportato nei cap. 2 e 3) tra le quali quella ritenuta fondamentale è la tecnica PEA per la determinazione della densità di carica netta (cap. 3). Per ragioni di tempo non è stato possibile esaminare ogni singolo materiale utilizzando tutte le tecniche di prova a disposizione: la Tab. 4.1 riporta un elenco dei materiali studiati con le prove a cui ognuno è stato sottoposto.

I provini utilizzati nelle prove sono ricavati da film sottili di polimero, con spessori variabili fra 0.10 e 0.15mm. Le dimensioni e le forme dei provini sono diverse per le diverse tipologie di prova utilizzate e saranno maggiormente descritti in seguito. Tutti i campioni sono stati, alla produzione, trattati in stufa alla temperatura di 70°C per 72h allo scopo di eliminare i prodotti volatili, residui delle reazioni di reticolazione (metano, metanolo, acqua, ecc.) e, successivamente, hanno subito un ulteriore trattamento in laboratorio ad 80°C per 90h, per

eliminare eventuali residui ancora presenti nel materiale.

Tabella 4.1

Materiali utilizzati nelle prove. Le X indicano quali prove sono state eseguite su un dato materiale.

Materiale	Conduzione	Vita	Rigidità	PEA	PEA inversione
845/01 rif.	X	X	X	X	X
845/01x					X
845/02	X		X		
845/03	X	X	X	X	X
845/08	X		X		
845/09	X	X	X		
845/10			X		
845/11			X		
845/12			X		
845/13			X		
845/14			X		
845/15			X		
845/20			X		
845/21			X		X
845/22	X		X		X
845/22B					X
845/41			X		
845/80			X		
845/81			X		
845/100			X		
845/101			X		
XLPE A				X	
P0					X
P1					X
P2					X
P3					X
P4					X
P5				X	X
P6					X
P7					X
P8					X
P9					X
P10					X
P11					X
P12					X
P13					X
P14					X
P15					X
P16					X
P17					X
P18					X
P19					X
P20					X
P21					X
P22					X

4.1 Misure di conducibilità

La conducibilità elettrica dei polimeri, in regime di corrente continua, è stata studiata da molti ricercatori in un ampio intervallo di campi elettrici e temperature con lo scopo di determinare il meccanismo di conduzione dominante, in un dato materiale, ed eventualmente di ottenere dei nuovi strumenti di diagnosi. Il legame ipotizzato da molte teorie tra le proprietà della conduzione e la carica spaziale ha recentemente portato a tentare l'utilizzo della misura di conducibilità per la determinazione delle proprietà dei materiali rispetto alla carica spaziale. In particolare, misure di conducibilità sono state proposte per la determinazione, con prove a breve termine, della soglia di intrappolamento della carica spaziale [31 e 32]. Proprio allo scopo di meglio investigare questa importante possibilità, nel presente lavoro sono state eseguite le misure di conducibilità i cui risultati sono qui illustrati.

I gradienti di campo elettrico utilizzati nelle prove di conducibilità sono stati scelti in un intervallo compreso fra 1kV/mm e 60kV/mm, al fine di poter studiare il comportamento del materiale in un ampio intervallo di sollecitazioni elettriche. La valutazione del campo elettrico da applicare al campione è stata fatta supponendolo uniforme e quindi pari a V/d , dove V è la tensione di prova e d è lo spessore medio del campione.

La durata delle prove è risultata estremamente variabile e generalmente condizionata dal raggiungimento del valore di regime (corrente di conduzione) della corrente di carica.

Particolare cura è stata posta nello studio dell'XLPE puro (XLPE 845/01), essendo questo il materiale di riferimento con cui confrontare i materiali additivati. Per questa ragione solo per l'XLPE 845/01 sono state eseguite prove a diversi valori di temperatura e con diversi materiali elettrodi.

La forma e le dimensioni dei provini utilizzati nelle prove di conducibilità sono riportati nel par. 2.1.1.

4.1.1 Risultati delle prove effettuate sul polietilene reticolato (XLPE 845/01)

4.1.1.1 Prove di carica a temperatura ambiente con elettrodi in oro

Nella Fig. 4.1 sono riportate, come esempio, alcune delle caratteristiche corrente-tempo (I-t) ottenute nelle prove di conducibilità compiute sul polietilene reticolato puro (XLPE 845/01) con elettrodi in oro. Le caratteristiche sono riportate in diagrammi bilogarithmici per mettere maggiormente in evidenza l'andamento della corrente nei primi istanti della prova.

Dall'analisi delle curve si può notare un transitorio iniziale in cui si presentano i fenomeni di

polarizzazione e di orientamento, che originano la corrente di spostamento, seguito da una condizione di regime, caratterizzata dalla corrente di conduzione.

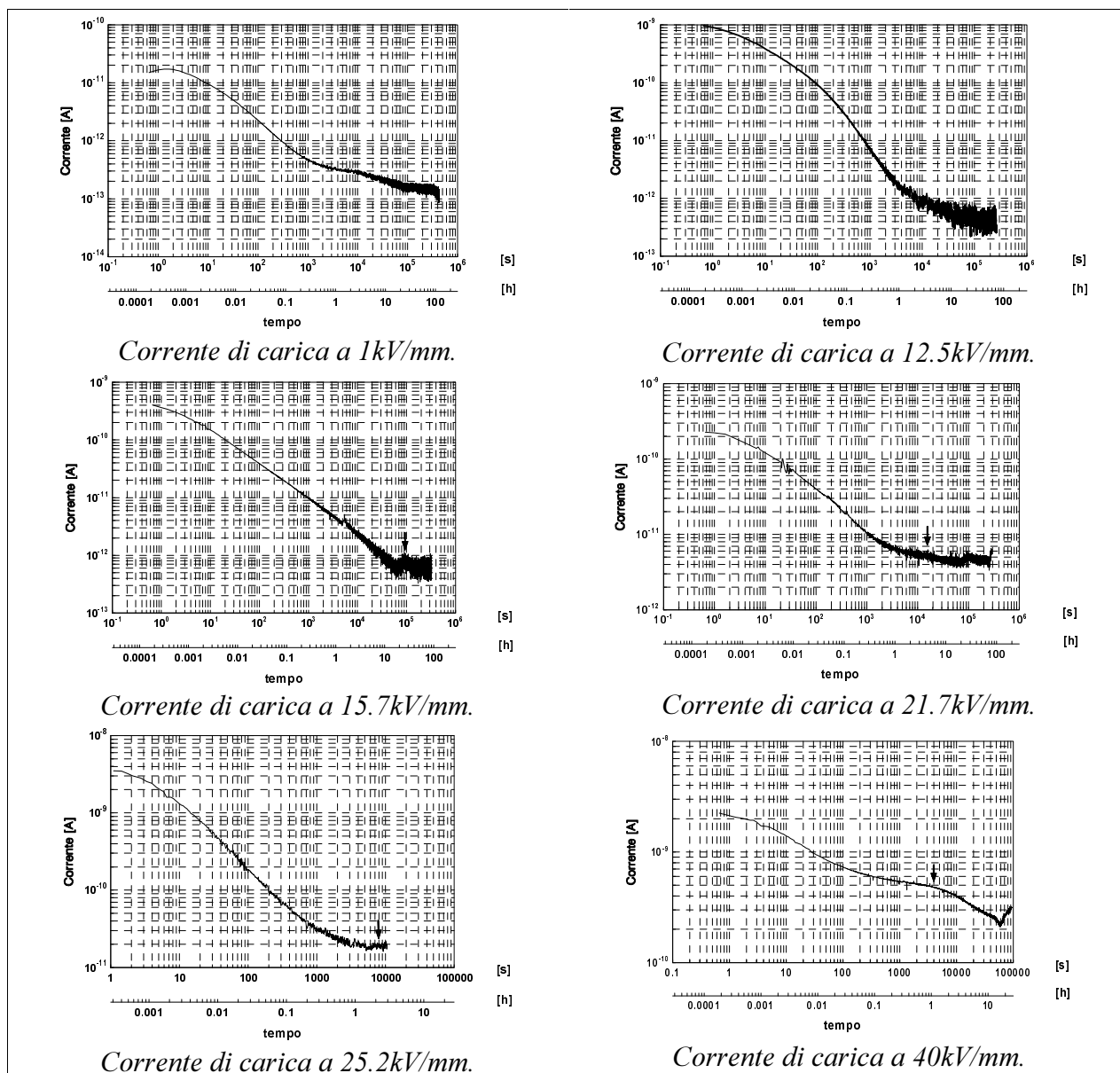


Figura 4.1

Caratteristiche di carica dell'XLPE 845/01, ottenute con elettrodi in oro a temperatura ambiente.

I diagrammi corrente-tempo, come quelli appena riportati, permettono di ottenere il valore di regime della corrente di carica, dal quale, dividendo per la superficie dell'elettrodo, si risale alla densità di corrente a regime.

Nel caso in cui, nel corso della prova, non si raggiunga una chiara condizione di regime, il valore di corrente può essere estrapolato dall'andamento della caratteristica I-t.

Nella Fig. 4.2 sono riportati, in un diagramma bilogarithmico, i valori della densità di corrente a regime in funzione del campo elettrico applicato (caratteristica J-E). L'andamento della

caratteristica ottenuta sembra indicare una conduzione di tipo SCLC, anche se la pendenza della caratteristica ad alti campi è maggiore di due (par. 1.3.3).

In un diagramma bilogarithmico la pendenza della caratteristica J-E indica l'esponente che lega la densità di corrente al campo elettrico. Questo significa che fino ad un valore di campo elettrico applicato pari a circa 14kV/mm (E_{t01}), dove si ha una pendenza pari a 0.7, la dipendenza della densità di corrente dal campo è praticamente lineare ($J \propto E^{0.7}$). Al di sotto di tale limite di campo elettrico si può quindi ritenere valida la legge di Ohm. Oltre i 14kV/mm, invece, la pendenza della caratteristica J-E assume il valore 2.1 e si può ipotizzare il passaggio ad un meccanismo di conduzione diverso.

Nell'intervallo di valori del campo elettrico compreso fra i 20 ed i 30kV/mm si ha una discontinuità della caratteristica J-E, oltre tale intervallo la pendenza passa da 2.1 a 3. Questa discontinuità è spiegabile in termini di teoria SCLC come il passaggio dalla legge di Child per trappole non sature alla legge di Child per trappole sature (par. 1.3.3).

Il valore di campo elettrico oltre il quale si passa dalla legge di Ohm ad una diversa dipendenza della densità di corrente dal campo applicato viene solitamente indicato come il valore oltre il quale si inizia ad avere accumulo di carica spaziale. Questo valore diventa quindi un importante parametro per qualificare un materiale candidato all'utilizzazione in HVDC.

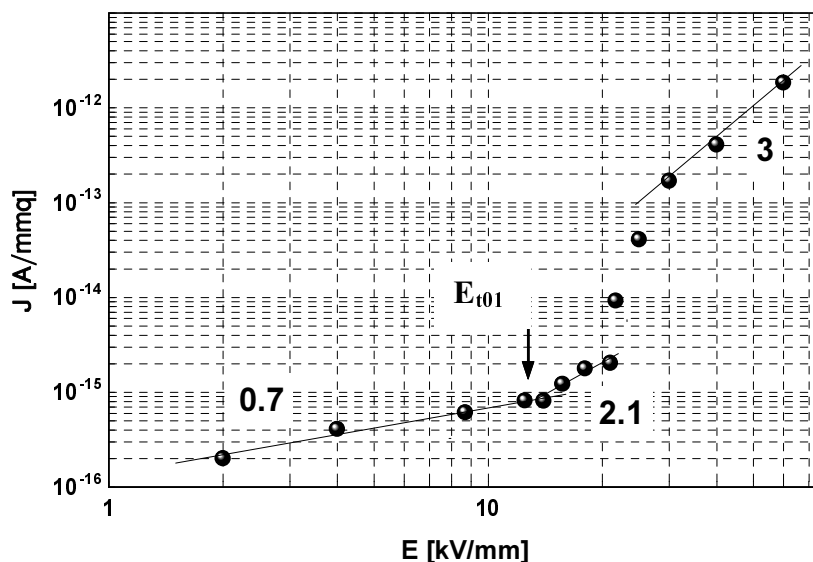


Figura 4.2

Caratteristica densità di corrente a regime-campo elettrico per l'XLPE 845/01. E_{t01} è il valore di campo elettrico a cui avviene la transizione dalla conduzione ohmica ad un diverso meccanismo di conduzione. Vicino ad ogni retta di regressione è riportata la rispettiva pendenza.

In alcuni casi durante la carica si sono osservati degli andamenti anomali, cioè si sono verificati degli aumenti della corrente (picchi evidenziati con delle frecce nella Fig. 4.1). In

alcuni casi non si osserva un vero e proprio aumento della corrente, ma solo un cambiamento di pendenza nella curva. Quest'ultimo fenomeno potrebbe essere imputato al fatto che il fronte della carica spaziale non giunge compatto all'anodo, ma si disperde lungo il tragitto interelettrodico (fenomeno LFD, par.1.3.4).

Riportando in un diagramma bilogarithmico il tempo (t_p) a cui si verifica il primo picco nella caratteristica I-t in funzione del campo elettrico, si è ottenuto l'andamento riportato in Fig. 4.3, dove si può osservare che, per campi elettrici applicati superiori ai 15.7kV/mm, i punti sperimentali si allineano bene su di una retta con pendenza pari a -3.5. Per campi elettrici inferiori a questo valore, si riscontra un massimo di corrente ad un tempo di circa 90000s, pressoché indipendente dal campo elettrico applicato. La ragione della mancanza di una relazione precisa fra tempo al picco e campo elettrico è ancora materia di studio.

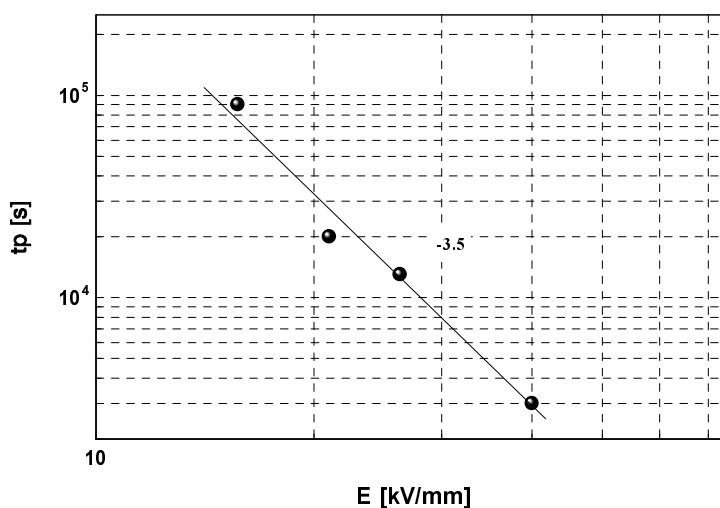


Figura 4.3

Tempo a cui si verifica il primo picco in funzione del campo elettrico (XLPE 845/01, temp. amb., elettrodi in oro). Nel grafico viene riportata la pendenza della retta di regressione che approssima i punti sperimentali.

E' interessante notare che la dipendenza fra tempo al primo picco e campo elettrico cessa di esistere per valori di campo elettrico prossimi alla soglia di transizione tra la conduzione ohmica ed il regime SCLC in presenza di trappole.

La relazione trovata fra il tempo a cui si verifica il primo picco ed il campo elettrico applicato non è in accordo con l'interpretazione dei picchi fornita da Many e Rakavy nell'ambito della teoria SCLC (par. 1.3.6); infatti, secondo questa teoria, t_p dovrebbe essere inversamente proporzionale al campo elettrico applicato, fornendo, quindi, una pendenza pari a -1 in un diagramma bilogarithmico t_p -E.

In definitiva, mentre dalla caratteristica J-E sembra ipotizzabile un meccanismo di conduzione

SCLC, la caratteristica t_p -E si discosta notevolmente da quanto previsto da questa teoria. Nel tentativo di determinare con certezza il meccanismo di conduzione nell'XLPE 845-01 si sono eseguite, quindi, ulteriori prove con materiali elettrodi diversi dall'oro.

4.1.1.2 Prove di carica a temperatura ambiente con elettrodi in alluminio

Nelle Fig. 4.4 sono riportati, in diagramma bilogarithmico, due esempi delle caratteristiche I-t ottenute con elettrodi in alluminio nelle prove sull'XLPE 845-01.

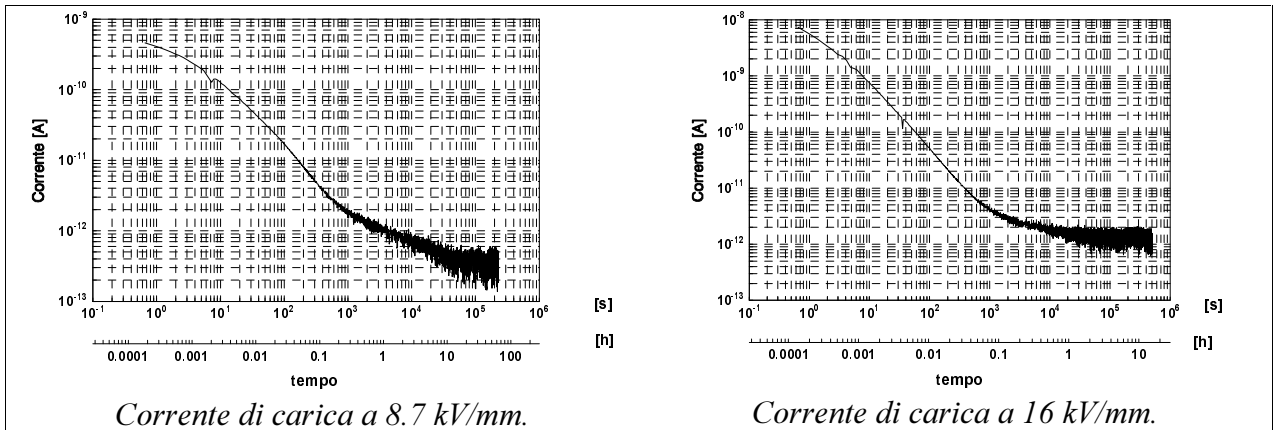


Figura 4.4

Caratteristiche di carica dell'XLPE 845/01, ottenute con elettrodi in alluminio a temperatura ambiente.

Nella Fig. 4.5 è riportata la corrispondente caratteristica J-E, confrontata con l'analogha caratteristica ottenuta con elettrodi in oro (Fig. 4.2). Il diagramma mette in evidenza che al di sotto della soglia di transizione E_{t01} il valore della densità di corrente a regime non varia al variare della metallizzazione, mentre al di sopra di E_{t01} il valore della densità di corrente a regime subisce modeste variazioni.

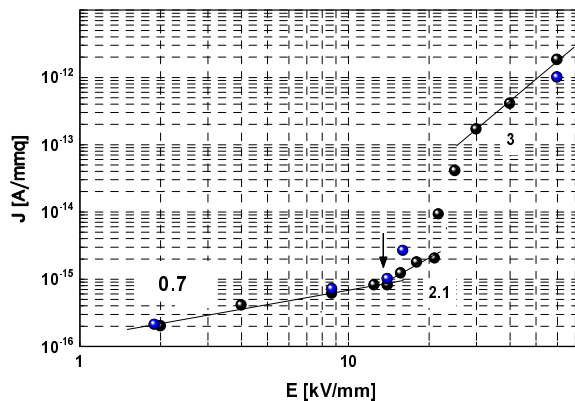


Figura 4.5

Confronto fra la caratteristica J-E dell'XLPE 845/01 metallizzato in oro (simboli neri) e metallizzato in alluminio (simboli blu).

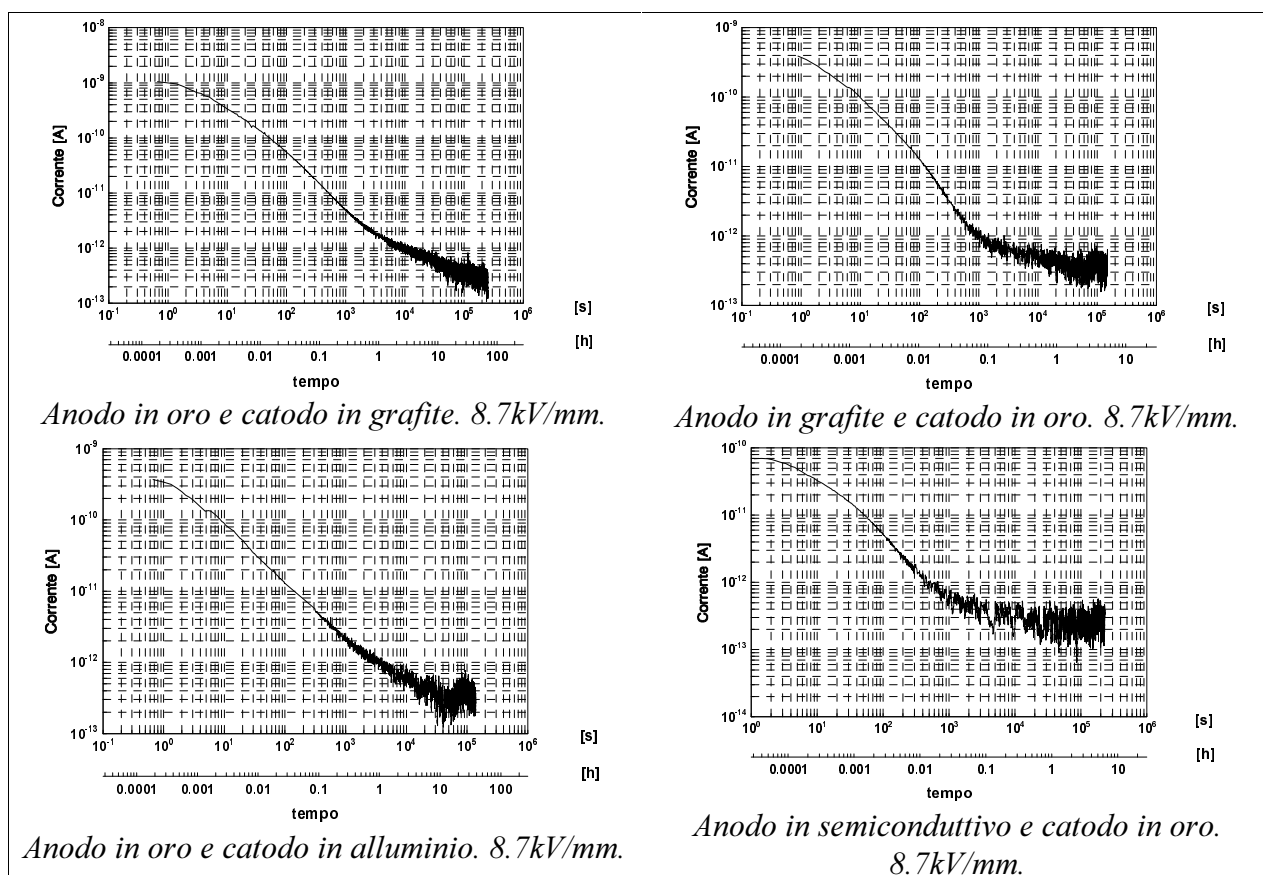
4.1.1.3 Prove di carica a temperatura ambiente con elettrodi misti.

Nella Tab. 4.2 sono riassunte le prove di carica eseguite con elettrodi misti, cioè con configurazioni elettrodiche dove anodo e catodo sono costituiti da materiali diversi.

Tabella 4.2
Prove di carica eseguite con configurazione elettrodica mista.

Catodo	Anodo	Campo di Carica [kV/mm]
Grafite	Oro	8.7; 40
Oro	Grafite	8.7; 25
Semiconduttivo	Oro	8.7; 25
Oro	Alluminio	8.7

Nella Fig. 4.6 sono riportate, sempre in diagramma bilogarithmico, le caratteristiche I-t relative alle configurazioni elettrodiche descritte in Tab. 4.2.



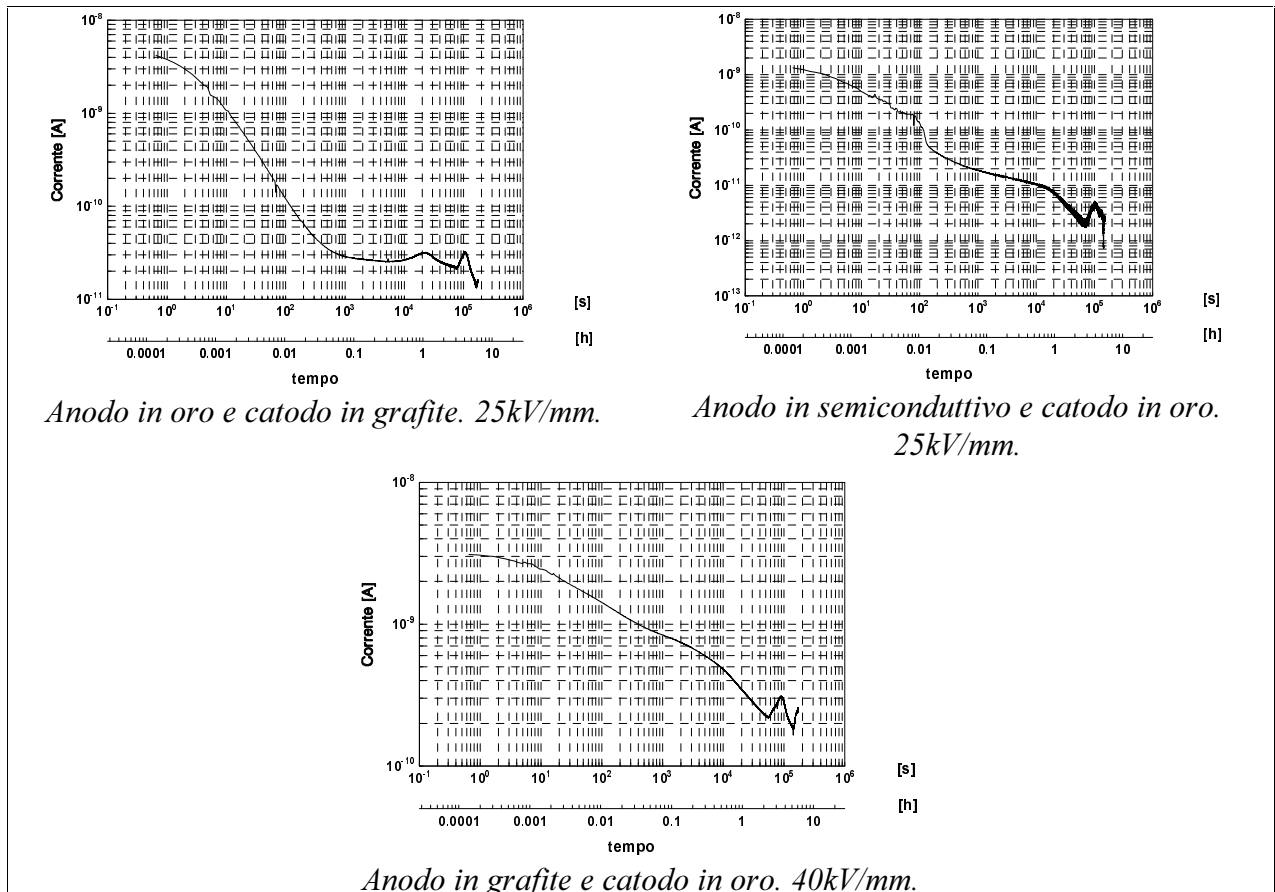


Figura 4.6

Caratteristiche di carica dell'XLPE 845/01, ottenute con elettrodi misti a temperatura ambiente.

Osservando le caratteristiche di carica e confrontandole con quelle ottenute con elettrodi in oro si può affermare che, per campi applicati inferiori alla soglia di transizione E_{t01} , il valore di densità di corrente a regime risulta indipendente dal materiale elettrodico. Al contrario, per valori di campo superiori alla soglia di transizione E_{t01} , il valore di densità di corrente dipende dal materiale elettrodico.

4.1.1.4 Prove di carica a 40°C con elettrodi in oro

Nella Fig. 4.7 sono riportate le caratteristiche I-t relative a due prove di carica svolte a 40°C. In questo caso gli elettrodi utilizzati sono di nuovo entrambi in oro.

Dalle figure si può notare che già a 40°C l'andamento della corrente di carica si differenzia notevolmente da quello a 20°C.

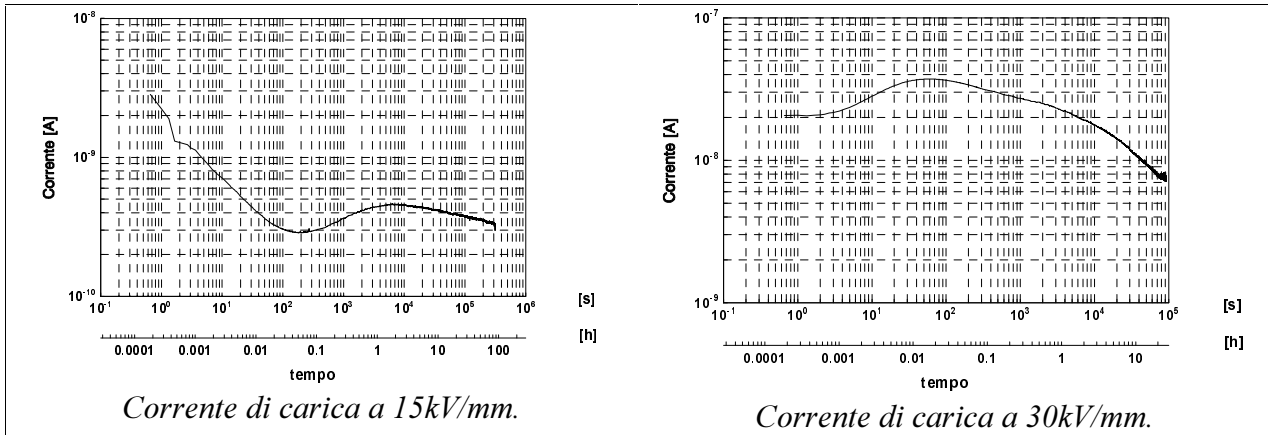


Figura 4.7

Caratteristiche di carica dell'XLPE 845/01, ottenute con elettrodi in oro a 40°C.

4.1.1.5 Prove di Carica a 60°C con elettrodi in oro

Nella Fig. 4.8 sono riportate alcune delle caratteristiche I-t relative alle prove di carica svolte a 60°C. Anche in questo caso gli elettrodi utilizzati sono entrambi in oro.

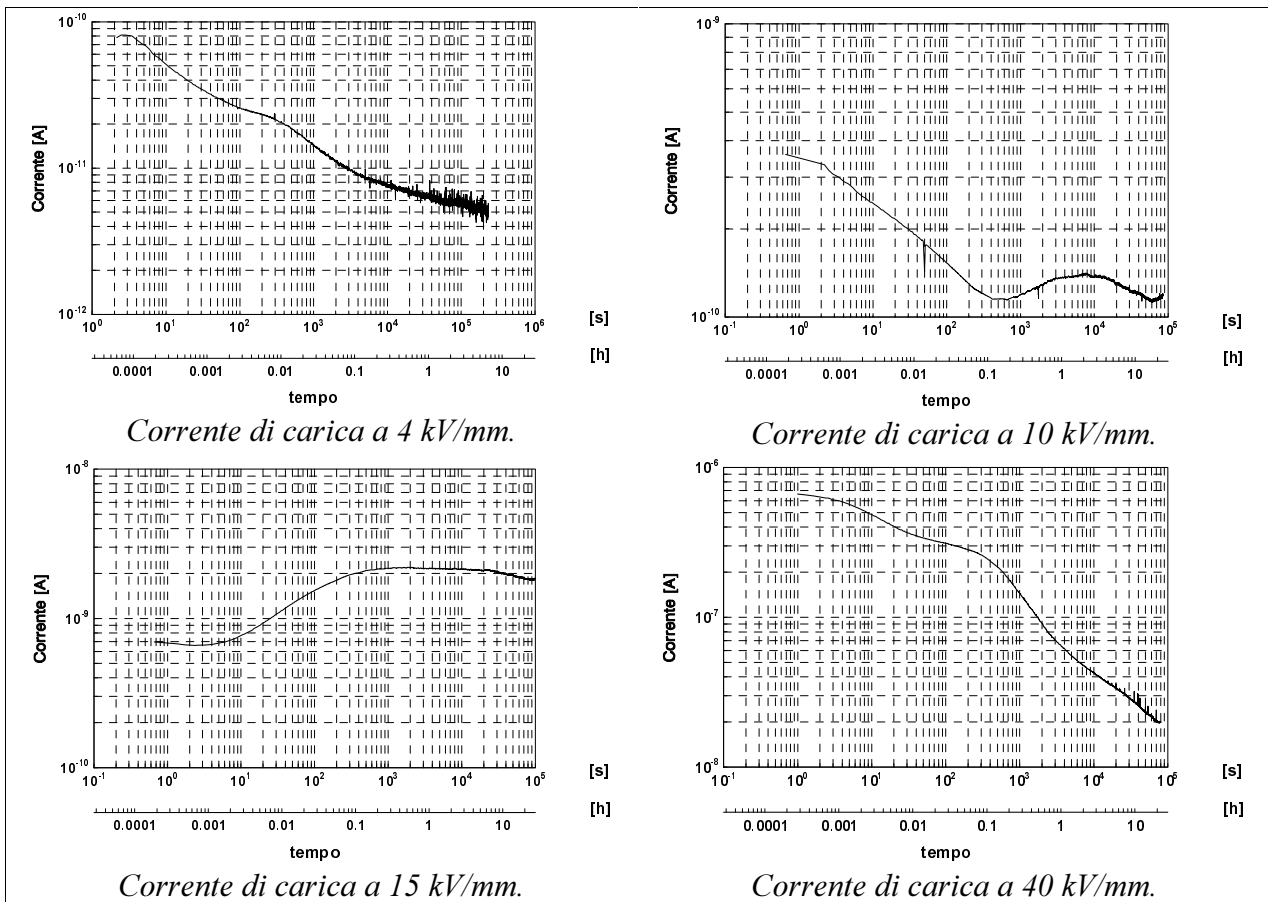


Figura 4.8

Caratteristiche di carica dell'XLPE 845/01, ottenute con elettrodi in oro a 60°C.

Nella Fig. 4.9 è riportata la caratteristica J-E alla temperatura di 60°C. L'andamento, in questo caso, è esattamente quello tipico della teoria SCLC. Dopo un primo tratto con pendenza unitaria, in cui vale la legge di Ohm, al valore di campo elettrico applicato pari a 3kV/mm ($E_{t-01\ 60^\circ\text{C}}$) si ha un aumento della pendenza della caratteristica, che diventa 2. Per valori di campo elettrico applicato superiori la caratteristica trasla verso l'alto per poi riprendere la pendenza 2.

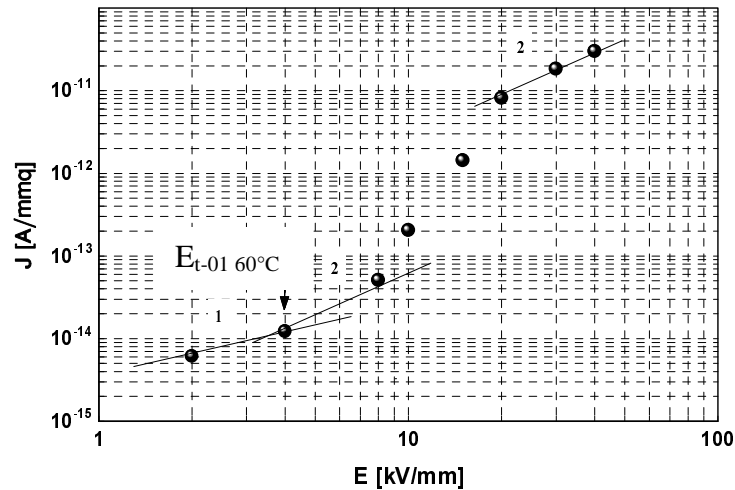


Figura 4.9

Densità di corrente a regime in funzione del campo elettrico applicato per l'XLPE 845/01 a 60°C.

Nella Fig. 4.10 sono invece riportati i tempi al picco, ottenuti nelle prove a 60°C, in funzione del campo elettrico applicato. Anche in questo caso, come già osservato per le prove a 20°C, la pendenza della retta (-2.7) si discosta notevolmente da quella proposta da Many e Rakavy nell'ambito della teoria SCLC.

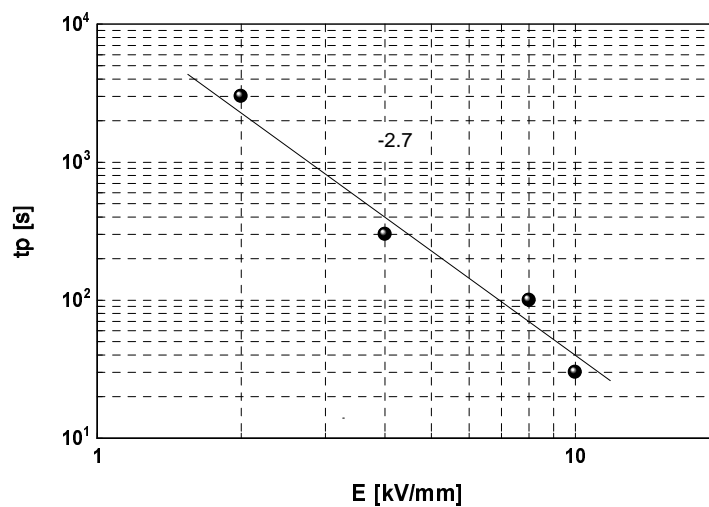


Figura 4.10

Tempo a cui si verifica il primo picco in funzione del campo elettrico (XLPE 845/01, 60 °C, elettrodi in oro). Nel grafico viene riportata la pendenza della retta di regressione che approssima i punti sperimentali.

4.1.1.6 Discussione dei risultati ottenuti dalle prove di conducibilità sull'XLPE 845/01

Le prove di conducibilità effettuate sul polietilene reticolato puro consentono di trarre importanti conclusioni sul meccanismo che regola la conduzione in questo materiale.

Nella Fig. 4.11 sono riportate le caratteristiche di carica a 8.7kV/mm con tre diversi tipi di elettrodi. Poiché il valore della corrente a regime risulta il medesimo in tutti i casi, si può ipotizzare un meccanismo di conduzione prevalentemente ionico (par. 1.3.2.1).

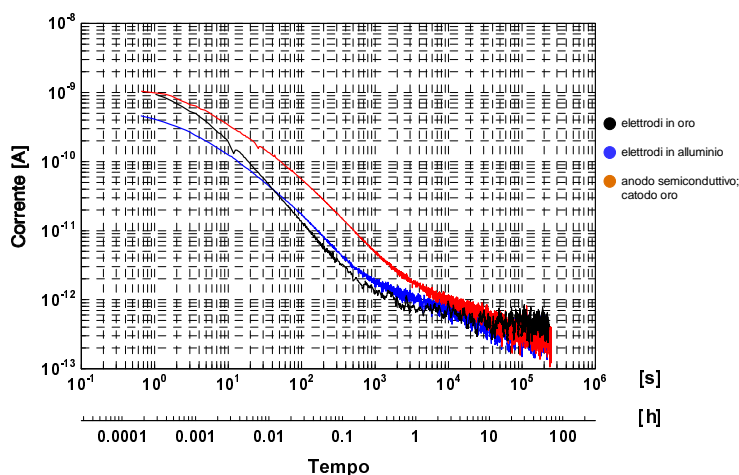


Figura 4.11

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

Per valori di campo elettrico applicato maggiori della soglia di transizione E_{t01} , invece, il valore della corrente a regime dipende in maniera non trascurabile dal tipo di metallizzazione usato (Fig. 4.12). Si può, quindi, concludere che in questo caso i portatori di carica non sono più esclusivamente ionici, ma anche elettronici. Un contributo all'interpretazione di questi dati può essere ottenuto dalle prove di PEA che saranno successivamente discusse.

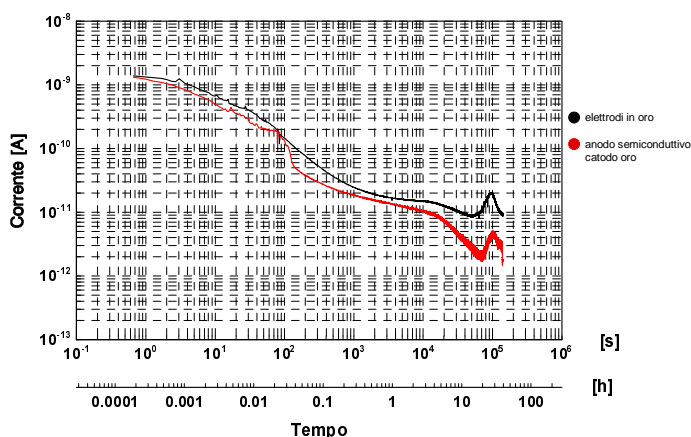


Figura 4.12

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

Nella Fig. 4.13 sono riportate sullo stesso diagramma le caratteristiche J-E, relative all'XLPE 845-01, ottenute con elettrodi in oro a temperatura ambiente, a 40 e a 60°C. Si può osservare una forte dipendenza della densità di corrente a regime (e quindi della conducibilità) dalla temperatura. All'aumentare della temperatura si nota, inoltre, una forte diminuzione della soglia di transizione dal comportamento ohmico ad una diversa legge di conduzione, che, infatti, passa da 14kV/mm a temperatura ambiente a 3kV/mm a 60°C.

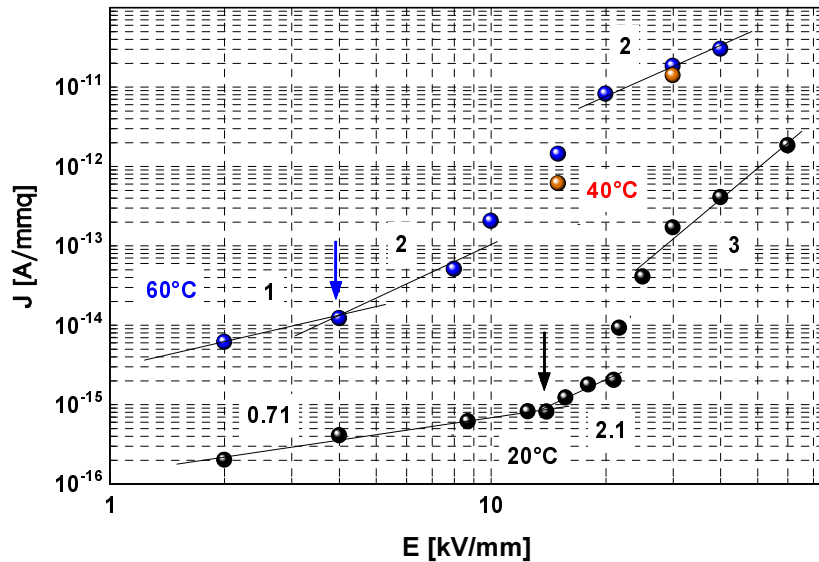


Figura 4.13

Confronto delle caratteristiche densità di corrente a regime-campo elettrico per diverse temperature di prova.

Nella Fig. 4.13 si può anche osservare che i valori ottenuti nelle prove a 40°C non sono molto diversi da quelli a 60°C, indicando che il fenomeno legato a questa variazione si manifesta già a temperature di poco superiori a quella ambiente.

4.1.2 Risultati delle prove di conducibilità per i materiale additivati

In questo paragrafo sono riportati i risultati ottenuti nelle prove di conducibilità effettuate su diversi materiali additivati. In particolare per ogni materiale sarà riportata la caratteristica J-E confrontata con quella del materiale di riferimento.

Lo scopo del confronto è quello di valutare l'effetto dell'additivo sul valore del campo elettrico di transizione tra la conduzione di tipo ohmico e la conduzione di altro tipo. Tale transizione dovrebbe indicare anche l'inizio del fenomeno di accumulo della carica.

Tutte le caratteristiche si riferiscono a prove eseguite con elettrodi in oro e alla temperatura ambiente.

4.1.2.1 Prove di carica sul materiale 845/02

Nella Fig. 4.14 sono riportati i valori della densità di corrente a regime in funzione del campo elettrico, confrontati con quelli dell'XLPE 845/01. Nel grafico si può notare un primo tratto di caratteristica, con pendenza pari a 1.2, in cui si può assumere valida la legge di Ohm. Approssimativamente intorno ai 20kV/mm ($E_{t(02)}$) si ha il passaggio alla conduzione in regime SCLC. L'ultimo tratto della caratteristica, che corrisponde alla legge di Child con trappole sature, ha una pendenza pari a 2.6.

Dal confronto col materiale di riferimento, si può notare uno spostamento verso campi più alti della soglia di transizione E_t , che può essere associata ad un valore più alto del campo al di sotto del quale non si ha accumulo di carica. Si può inoltre osservare che il materiale 845/02 presenta, rispetto al riferimento, valori di corrente maggiori nel tratto ohmico della caratteristica, mentre in corrispondenza della conduzione limitata dalla carica spaziale si rilevano correnti della stessa ampiezza.

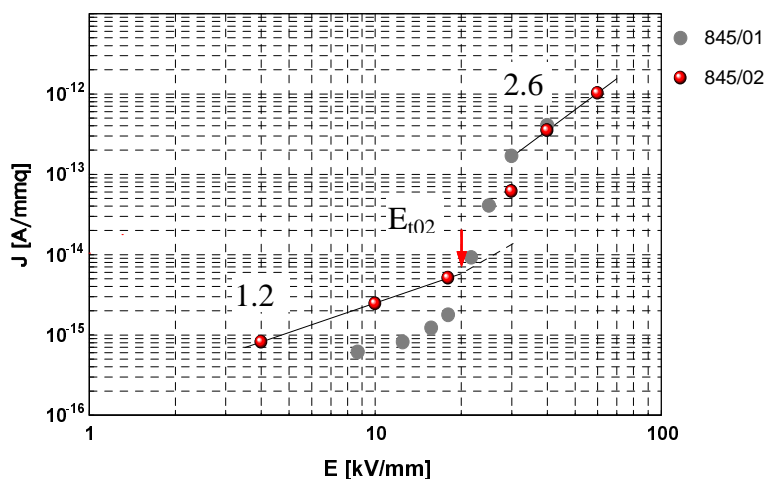


Figura 4.14

Caratteristiche densità di corrente a regime-campo elettrico per il materiale 845/02. $E_{t(02)}$ è la soglia di transizione che separa la conduzione ohmica dal regime SCLC in presenza di trappole. Sul grafico sono indicate le pendenze delle caratteristiche.

Anche per questo materiale, nelle caratteristiche I-t, sono stati rilevati degli andamenti anomali (par. 4.3). Come per l'XLPE 845/01, specialmente ai campi elettrici più bassi, non si osserva un vero e proprio massimo della corrente, ma solo un cambiamento della pendenza nella caratteristica che può essere imputato al fenomeno LFD (par.1.3.6).

Riportando in un diagramma bilogarithmico i tempi a cui si verifica il primo picco in funzione del campo elettrico, i punti si allineano su una retta di pendenza pari a -0.81 (Fig. 4.15), cioè il tempo al picco risulta proporzionale ad $E^{-0.81}$. Questo andamento concorda con l'interpretazione

dei picchi fornita da Many e Rakavy nell'ambito della teoria SCLC (par. 1.3.7).

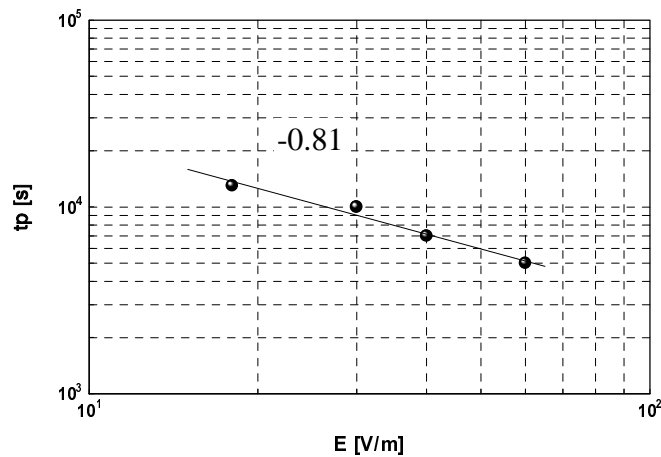


Figura 4.15

Tempo al primo picco in funzione del campo elettrico e relativa pendenza della caratteristica.

4.1.2.2 Prove di carica sul materiale 845/03

Nella Fig. 4.16 sono riportati, confrontati con quelli dell'XLPE 845/01, i valori della densità di corrente a regime in funzione del campo elettrico. Il diagramma evidenzia un primo tratto di caratteristica con pendenza pari a 0.8 in cui si può ritenere valida la legge di Ohm. Per valori di campo elettrico applicato superiori a circa 9 kV/mm (E_{t03}) si ha il passaggio ad un diverso meccanismo di conduzione e la pendenza della caratteristica J-E diventa 4.4, valore che si discosta notevolmente da quello proposto dalla teoria SCLC.

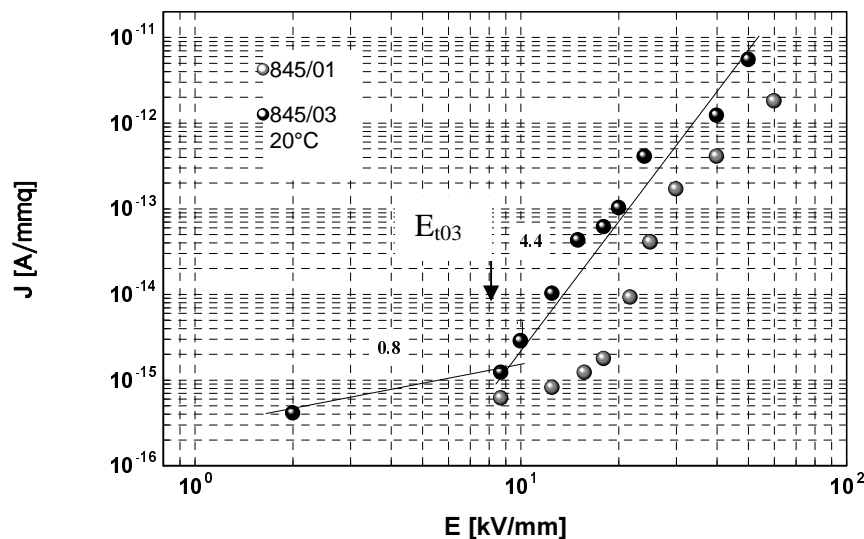


Figura 4.16

Caratteristiche densità di corrente a regime-campo elettrico per il materiale 845/03. E_{t03} è la soglia di transizione che separa la conduzione ohmica dal regime SCLC in presenza di trappole. Sul grafico sono indicate le pendenze delle caratteristiche.

Dal confronto con i dati relativi al materiale di riferimento, si può notare che i valori di densità di corrente a regime per il materiale 845-03 sono, in tutto l'intervallo di valori del campo elettrico applicato, maggiori di quelli del riferimento. Questo fatto indica che l'introduzione dell'additivo ha provocato un aumento della conducibilità. Il valore di soglia è, però, diminuito rispetto a quello del riferimento.

Nelle caratteristiche I-t si sono osservati, anche in questo caso, dei picchi. E' interessante notare a questo proposito che, nonostante la teoria SCLC non sembri applicabile alla caratteristica J-E, la relazione fra tempi al primo picco e campo elettrico è lineare (Fig. 4.17), come previsto dalla teoria di Many e Rakavy nell'ambito della teoria SCLC.

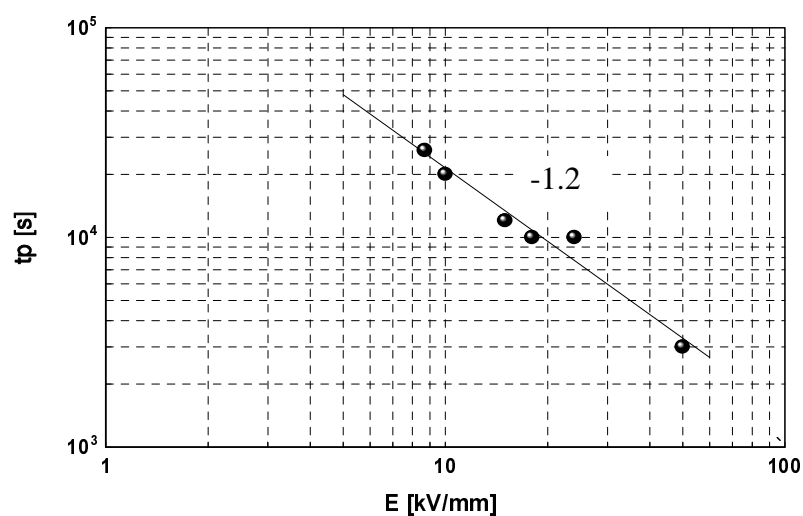


Figura 4.17

Tempo al primo picco in funzione del campo elettrico e relativa pendenza della caratteristica.

4.1.2.3 Prove di carica sul materiale 845/08

Nella Fig. 4.18 è riportata la caratteristica densità di corrente a regime-campo elettrico relativa al materiale 845/08, confrontata con quella del riferimento. La pendenza del primo tratto è pari a 1.1 e questo consente, quindi, di ritenere ohmica la conduzione fino a circa 20kV/mm. In questo caso si nota, quindi, un aumento del campo di transizione da 14 a 20kV/mm. Fra i 20 ed i 30kV/mm avviene la transizione al regime SCLC con trappole sature (pendenza 2.3) e si assiste ad un forte incremento della corrente, che rimane però inferiore a quella rilevata nell'XLPE 845/01.

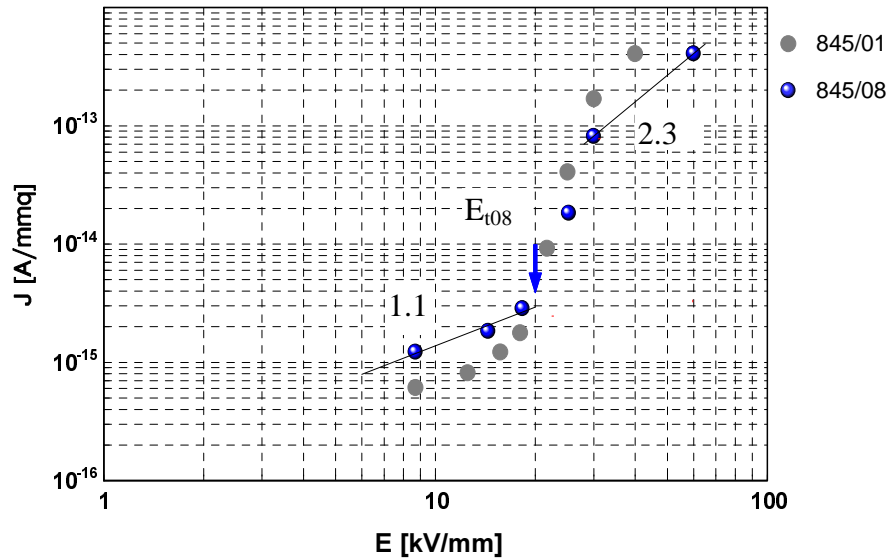


Figura 4.18

Caratteristiche densità di corrente a regime-campo elettrico per il materiale 845/08. E_{t08} è la soglia di transizione che separa la conduzione ohmica dal regime SCLC in presenza di trappole. Sul grafico sono indicate le pendenze delle caratteristiche.

Riportando i tempi al picco, rilevati nelle caratteristiche I-t, in funzione del campo elettrico (Fig. 4.19) si osserva che, mentre i punti corrispondenti a 30 e 25.2kV/mm si allineano su di una retta con pendenza unitaria, a 18.3kV/mm il massimo si presenta a tempi più alti. Inoltre, a 14.4kV/mm non si osserva nessun picco apprezzabile. Questo fatto induce a pensare che per valori di campo elettrico prossimi 14.5kV/mm ci si trovi in presenza di una soglia, al di sotto della quale non si presentano più i picchi giustificabili con la teoria SCLC. Si osservi che il valore di tale soglia è prossimo a quello del campo di transizione E_{t08} .

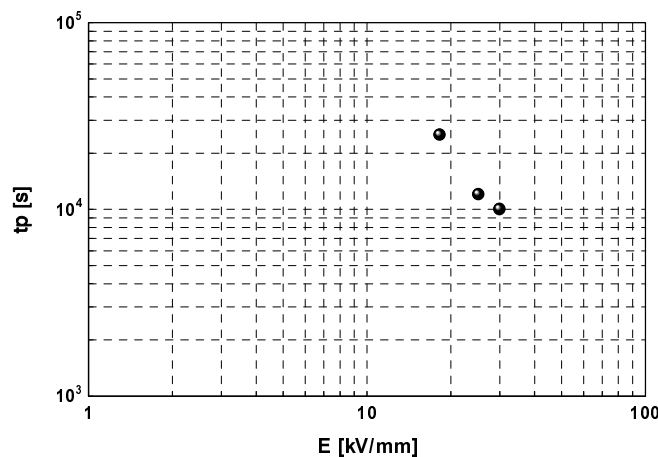


Figura 4.19

Tempo al primo picco in funzione del campo elettrico.

4.1.2.4 Prove di carica sul materiale 845/09

Nella Fig. 4.20 sono riportati i valori della densità di corrente a regime in funzione del campo elettrico applicato rilevati nelle prove sul materiale 845/09. Come per i precedenti materiali la caratteristica J-E è confrontata con quella del riferimento.

Fino ad un valore di campo elettrico pari a circa 18 kV/mm la caratteristica J-E mostra una pendenza pari a 1.1, quindi la dipendenza della densità di corrente dal campo elettrico applicato è praticamente lineare ($J \propto E^{1.1}$). Si può, quindi, ritenere valida la legge di Ohm.

Per campi elettrici superiori a 18 kV/mm, la pendenza della caratteristica J-E assume il valore di 3.3 e si può ipotizzare il passaggio ad un regime di conduzione SCLC in presenza di trappole. In un intervallo compreso tra i 30 ed i 36.9 kV/mm si passa da trappole parzialmente piene a trappole sature. Il fatto che la tensione a cui si ha l'incremento della corrente non sia ben definito può essere giustificato dalla presenza di trappole collocate in più livelli energetici. Per valori di campo oltre i 36.9 kV/mm, tutte le trappole dovrebbero essere piene e la pendenza in questo tratto è pari a 4.2.

Confrontando la caratteristica J-E con quella del materiale di riferimento, si osserva che, mentre a bassi campi il valore di densità di corrente a regime nel materiale 845-09 è superiore a quello ottenuto per l'XLPE 845-01, ad alti campi il comportamento dei due materiali sembra diventare il medesimo.

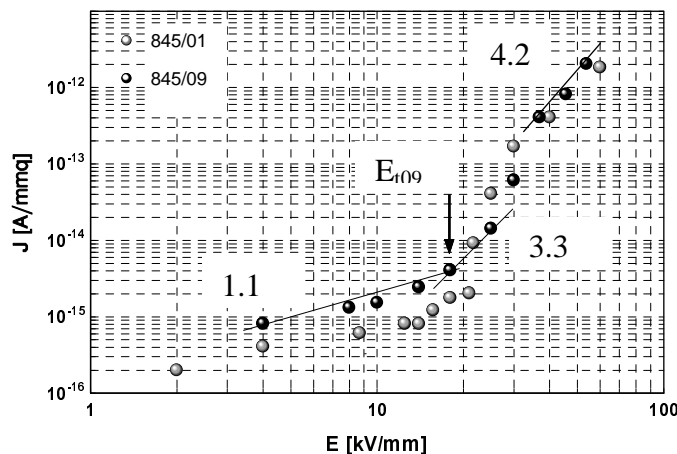


Figura 4.20

Caratteristiche densità di corrente a regime-campo elettrico per il materiale 845/09. E_{t09} è la soglia di transizione che separa la conduzione ohmica dal regime SCLC in presenza di trappole. Sul grafico sono indicate le pendenze delle caratteristiche.

Nella Fig. 4.21 sono riportati i tempi al picco, rilevati nelle caratteristiche I-t, in funzione del campo elettrico applicato; la retta che approssima i punti tracciati ha pendenza -2.2 . La relazione

trovata tra t_p (tempo a cui si verifica il primo picco) ed E è in accordo con quanto previsto dalla teoria di Fischer e Röhl (1.61) assumendo un valore di m pari a -2.2 , peraltro non dissimile da quanto trovato dagli autori in questione.

Anche in questo caso, come già sottolineato per l'XLPE 845/01, mentre dalla caratteristica J-E sembra ipotizzabile un meccanismo di conduzione SCLC, la caratteristica tempi al picco-campo elettrico si discosta notevolmente dalla teoria di Many e Rakavy.

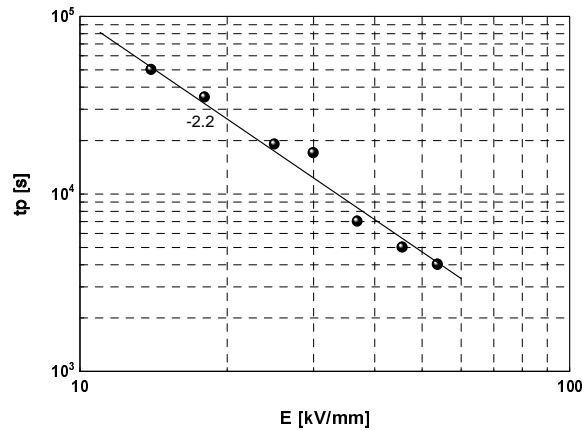


Figura 4.21

Tempo al primo picco in funzione del campo elettrico e relativa pendenza della caratteristica.

4.1.2.5 Prove di carica sul materiale 845/22

Nella Fig. 4.22 è rappresentata la caratteristica densità di corrente a regime-campo elettrico per il materiale 845/22, confrontata con la analoga caratteristica ottenuta per l'XLPE di riferimento.

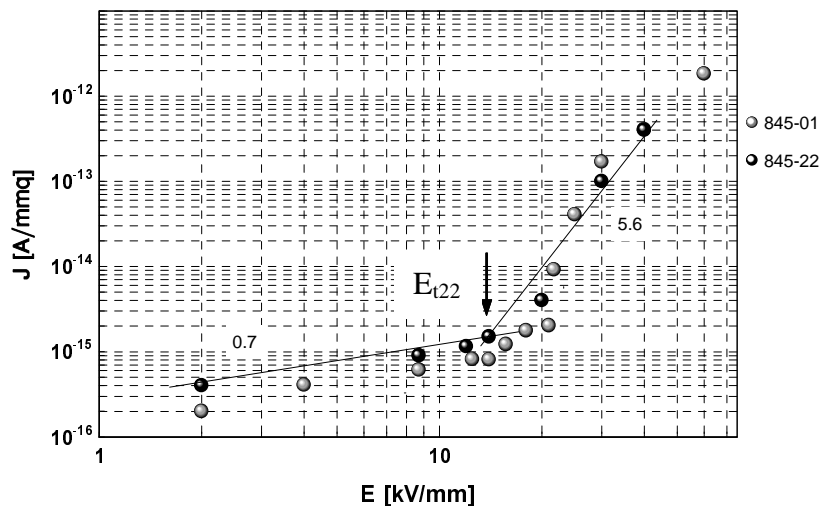


Figura 4.22

Caratteristiche densità di corrente a regime-campo elettrico per il materiale 845/22. E_{t22} è la soglia di transizione che separa la conduzione ohmica dal regime SCLC in presenza di trappole. Sul grafico sono indicate le pendenze delle caratteristiche.

Dalla figura si evince che il comportamento del materiale in esame, al variare del campo elettrico applicato, è molto simile a quello del riferimento. A conferma di quanto detto si può osservare che la soglia di transizione, da conduzione ohmica a diversa legge di conduzione, è la medesima per entrambi i materiali (14 kV/mm).

In questo materiale non è stato possibile trovare alcuna relazione fra il tempo a cui si verifica il picco ed il campo elettrico applicato, nonostante che sulle caratteristiche I-t siano comunque osservabili andamenti anomali.

4.1.2.6 Osservazione sulle prove di carica effettuate sui materiali additivati

Per la determinazione dell'esatto meccanismo di conduzione nei materiali additivati sarebbe stato necessario eseguire ulteriori prove di carica, con elettrodi diversi da quelli in oro. Tali prove, però, non sono state eseguite durante questo lavoro di tesi, in quanto lo scopo finale non era quello di determinare l'esatto meccanismo di conduzione in tutti i materiali, ma piuttosto quello di determinare parametri e metodi per un loro rapido confronto.

4.2 Misure di rigidità dielettrica

In questo paragrafo sono presentati i risultati delle prove di rigidità dielettrica effettuate sull'XLPE 845/01 e sui materiali additivati da esso ottenuti.

La tensione DC è applicata con una rampa pari a 8 kV/min. Le scariche avvengono, generalmente, in tempi compresi tra 3 e 6 minuti. La scelta di questo valore di rampa e, conseguentemente, di tempi di scarica relativamente lunghi aveva lo scopo di mettere maggiormente in evidenza l'eventuale azione dell'additivo.

Le prove sono state tutte effettuate utilizzando la cella ANSI/ASTM a campo quasi uniforme (cap. 2) su lotti costituiti da un numero di provini variabile da 8 a 10.

I dati ottenuti dalla prova sono stati trattati statisticamente con i metodi descritti nel cap. 2, al fine di ottenere i parametri della distribuzione di Weibull. Nella Fig. 4.23 è riportato un esempio di distribuzione di Weibull relativo ad una prova eseguita sull'XLPE 845/01. Nella figura sono riportati, in carta di Weibull, i punti sperimentali e la relativa retta di regressione, che permette di ottenere il valore di α (parametro di scala) e quello di β (parametro di forma). Sono anche riportati gli intervalli di confidenza al 95%.

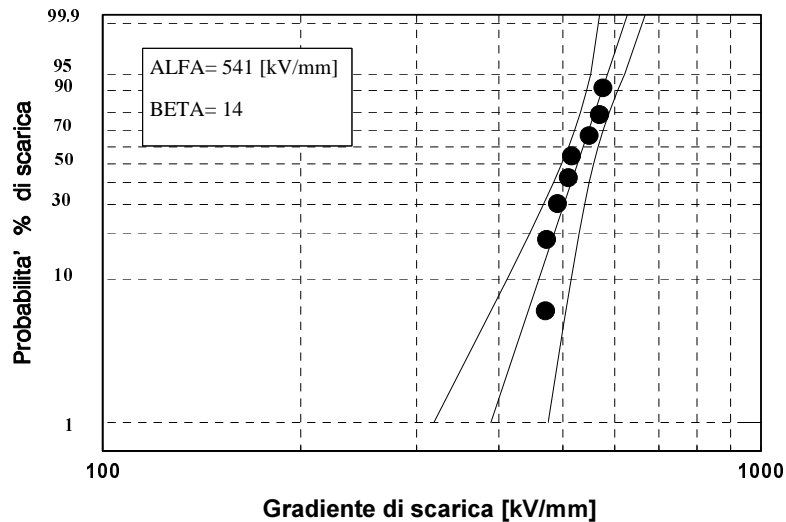


Figura 4.23

Rappresentazione in carta di Weibull dei dati sperimentali relativi ad una prova di rigidità dielettrica su XLPE 845/01. Sono riportati anche la retta di regressione e gli intervalli di confidenza al 95%.

Per ogni materiale la prova di rigidità è stata ripetuta su diversi lotti. Nelle Fig. 4.24 e 4.25 sono riportati i valori medi di α e β (con intervalli di confidenza al 95%), calcolati per ogni materiale come media dei valori ottenuti nelle singole prove di rigidità dielettrica.

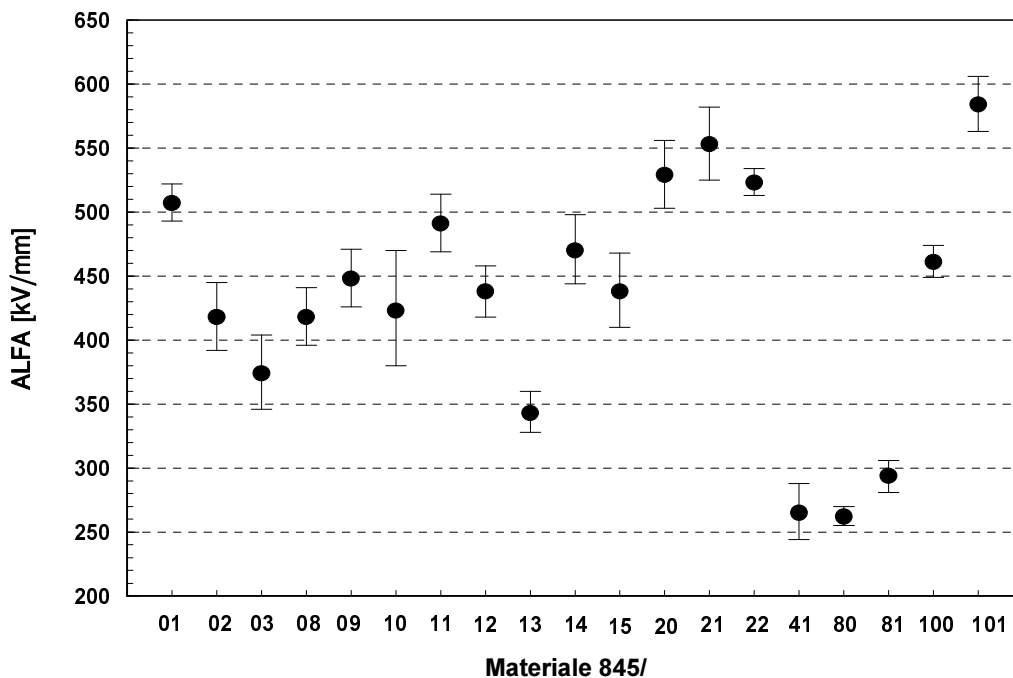


Figura 4.24

Valori medi di α e relativi intervalli di confidenza al 95%, ottenuti dalle prove di rigidità dielettrica per i diversi materiali (indicati con la sigla 845/-).

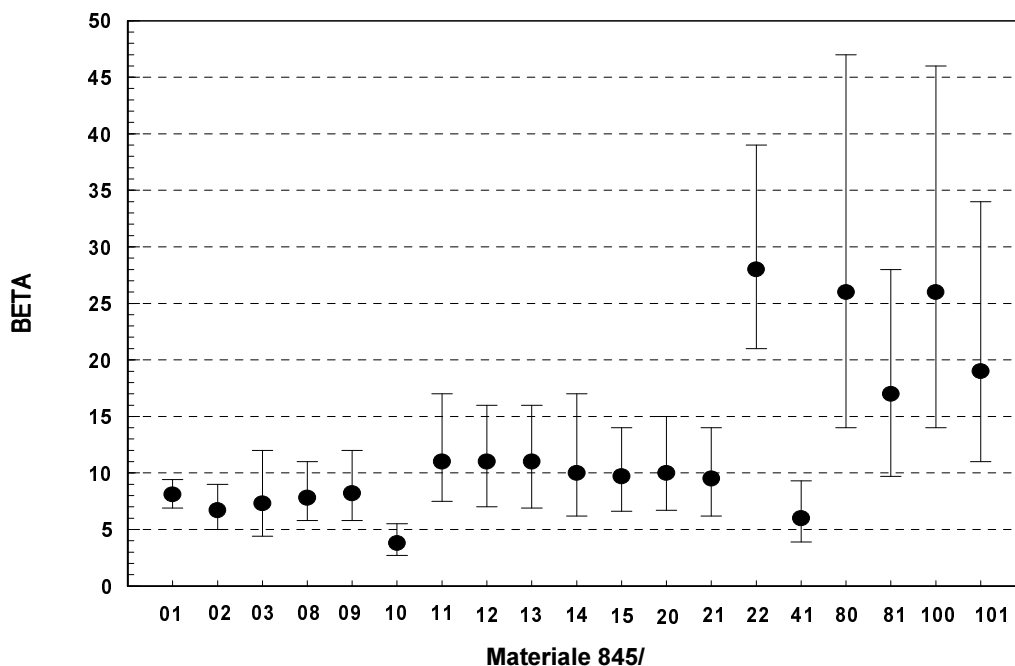


Figura 4.25

Valori medi di beta e relativi intervalli di confidenza al 95%, ottenuti dalle prove di rigidità dielettrica per i diversi materiali (indicati con la sigla 845/-).

Per mettere maggiormente in rilievo i diversi comportamenti dei materiali additivati rispetto all'XLPE 845/01 di riferimento, nella Fig. 4.26 sono riportati i valori del rapporto α/α_0 , dove con α_0 si indica il valore di α relativo al materiale di riferimento.

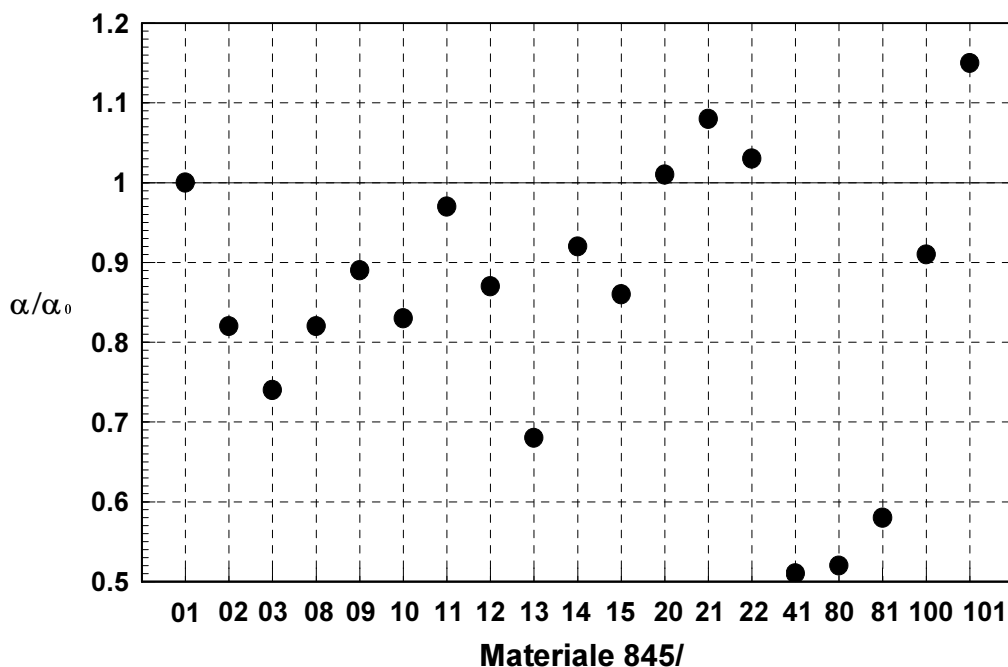


Figura 4.26

Valori di α della rigidità dielettrica per i diversi materiali provati, in valore relativo a quello del materiale di riferimento ($\alpha_0 = 508 \text{ kV/mm}$).

Osservando le Fig. 4.24 e 4.26 si nota come gli additivi siano effettivamente in grado di modificare il valore della rigidità dielettrica, ma risulta anche evidente che soltanto per pochi materiali (845/20, 845/21, 845/22, 845/101) il valore di rigidità dielettrica è superiore a quello dell'XLPE 845/01 di riferimento.

La variazione di α rispetto al valore α_0 è generalmente compresa entro il 20%. Al di fuori di questo intervallo si distinguono negativamente i materiali 845/03 e 845/13 (per i quali la diminuzione è circa del 30%), il materiale 845/81 (per il quale la diminuzione è circa del 40%) e i materiali 845/41 e 845/80 nei quali la diminuzione arriva al 50%.

Dalle prove eseguite risulta evidente che l'aggiunta di un additivo ha, nella maggior parte dei materiali, portato ad una diminuzione del valore di rigidità dielettrica. Ciò non significa che i nuovi materiali siano comunque peggiori del materiale di riferimento, in quanto la rigidità dielettrica è solo uno dei parametri della caratterizzazione elettrica di un materiale. A tal proposito si vuole sottolineare che lo scopo principale dell'additivo è il miglioramento dell'endurance, cioè un aumento dei tempi di vita a parità di sollecitazione elettrica, e non l'aumento della rigidità dielettrica. Il valore di quest'ultima è comunque un importante parametro per il confronto dei materiali.

Osservando la Fig. 4.26 si nota che per quanto riguarda il parametro di forma β i valori ottenuti sono approssimativamente simili per tutti i materiali; fanno eccezione solo i materiali 845/81 e 845/101 che presentano un valore di β circa doppio di quello relativo al materiale di riferimento (β_0 è di poco inferiore a 10) ed i materiali 845/22, 845/80 e 845/100 con un β circa tre volte superiore a β_0 . Questo significa che la dispersione dei risultati varia in misura limitata da un materiale all'altro. Si nota, inoltre, che i valori di β sono molto simili a quelli tipicamente ottenuti nelle prove di rigidità e questo può dare informazioni sulla buona omogeneità dei materiali testati.

4.3 Prove di invecchiamento elettrico

In questo paragrafo sono riportati i risultati delle prove di vita elettrica in DC, effettuate su alcuni dei materiali additivati e sul riferimento XLPE 845/01. In particolare sono stati sottoposti a prove di vita l'845/03 e l'845/09, contenenti additivi inorganici con valori di permittività relativa significativamente differenti (circa 4 per il 845/03 e circa 12 per il 845/09).