

Poiché le inversioni di polarità costituiscono uno stress aggiuntivo per i materiali utilizzati nei sistemi HVDC, sono state eseguite prove di vita elettrica sia mantenendo costante la polarità degli elettrodi sia invertendola ad intervalli regolari durante la prova. In quest'ultimo caso il tempo tra un'inversione e quella successiva è stato scelto in modo tale che, ai diversi campi, il numero delle inversioni fosse mediamente lo stesso. Questa scelta ha lo scopo di evitare l'introduzione di un'ulteriore variabile, il cui effetto è difficilmente valutabile, nella prova di vita.

Ogni materiale è stato, quindi, caratterizzato tramite due curve di vita elettrica, una relativa alle prove senza inversione di polarità e la seconda relativa alle prove con inversioni. Ogni curva di vita è stata ottenuta dall'interpolazione di tre o quattro punti, corrispondenti ai diversi campi elettrici di prova, applicando il modello dell'inversa potenza.

I dati delle prove di vita elettrica riportati sono relativi a test eseguiti su lotti generalmente costituiti da sei provini. Ogni provino era costituito da un "foglio di materiale" racchiuso tra due elettrodi di acciaio inossidabile a profilo pseudo-Rogowsky modificato (cap. 2), il tutto inglobato in resina epossidica (cap. 2).

Tutte le prove sono state eseguite a temperatura ambiente.

4.3.1 Prove di vita elettrica effettuate sull'XLPE 845/01

In Tab. 4.3 sono riportate le caratteristiche delle prove di vita eseguite sull'XLPE 845/01 di riferimento.

Tabella 4.3
Caratteristiche delle prove di vita eseguite sull'XLPE 845/01.

Campo elettrico applicato [kV/mm]	Tipo di prova
153	Senza inversioni
180	Senza inversioni
201	Senza inversioni
212	Senza inversioni
126	Con inversioni
149	Con inversioni
155	Con inversioni

Nella Fig. 4.27 è riportato un esempio di distribuzione di Weibull, ottenuta per i risultati relativi alla prova di vita eseguita senza inversioni di polarità e con campo elettrico applicato pari a 180kV/mm. Si noti che la distribuzione ottenuta è relativa a cinque soli punti sperimentali invece di sei (numero di provini utilizzati); ciò è dovuto al fatto che nella prova in esame è stata applicata una elaborazione statistica con censuramento progressivo di un punto (cap. 2).

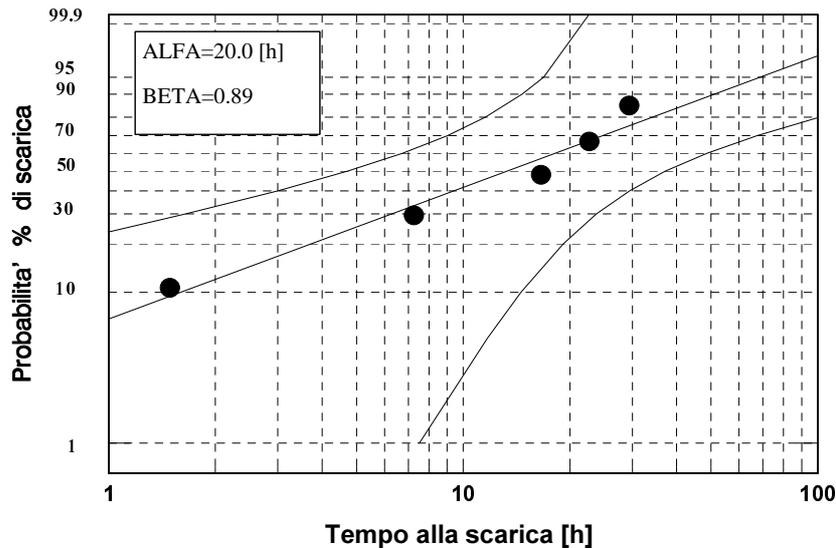


Figura 4.27

Distribuzione di Weibull relativa ai risultati ottenuti nella prova senza inversioni con campo elettrico applicato di 180 kV/mm.

I risultati relativi a tutte le prove di vita, eseguite sul materiale di riferimento, sono riportati nel diagramma bilogarithmico di Fig. 4.28. Come si può notare i punti si allineano abbastanza bene lungo una retta e questo significa che si può utilizzare il modello dell'inversa potenza (cap. 1 e 2). Alla pendenza delle rette di regressione, anch'esse riportate in Fig. 4.28, è legato il valore del coefficiente di *voltage endurance*, n . Quest'ultimo è il parametro solitamente utilizzato per la valutazione delle prestazioni di un materiale in termini di vita elettrica (cap. 1).

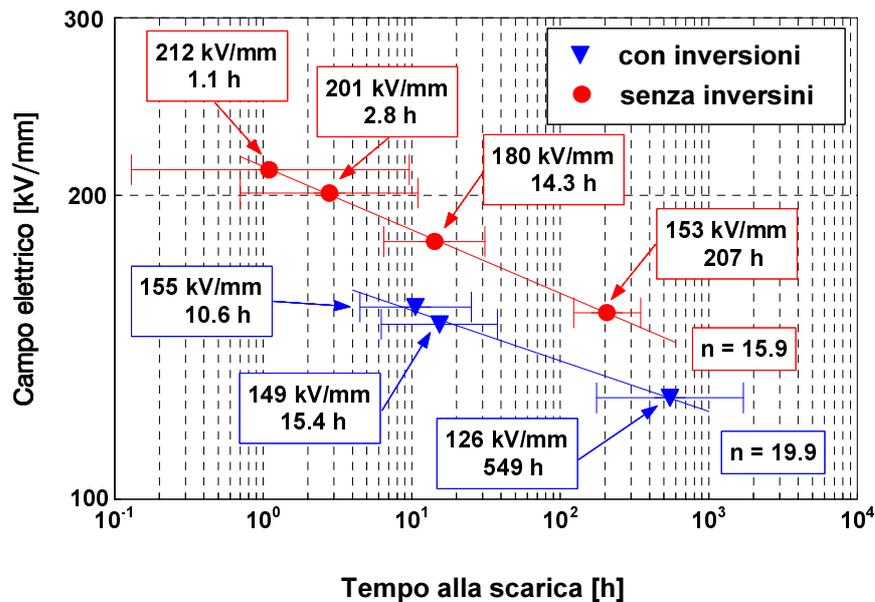


Figura 4.28

Confronto tra le curve di vita con e senza inversioni di polarità dell'XLPE 845/01. Con n è indicato il coefficiente di voltage endurance.

La Fig. 4.28 mette in chiara evidenza l'effetto che le inversioni di polarità producono in questo materiale. La retta di vita relativa alle prove con inversioni, infatti, si trova a tempi più bassi di almeno un ordine di grandezza rispetto a quelli della retta relativa alle prove senza inversioni. I risultati sperimentali, quindi, sostanzialmente confermano quanto era lecito attendersi.

Nella Fig. 4.28 si può osservare anche il valore di n per le due condizioni di prova. Come si può notare questo coefficiente ha un valore abbastanza alto sia per le prove senza inversioni sia per quelle con inversioni, in quest'ultimo caso anzi il valore di n è anche superiore al primo. Il più alto valore di n nelle condizioni di inversione di polarità può essere spiegato considerando che al diminuire del campo elettrico applicato l'effetto dell'inversione dovrebbe diventare via via sempre più trascurabile. In queste condizioni, allora, le due curve di vita devono coincidere. Ne deriva che la caratteristica inferiore dovrà, in un certo intervallo di valori di campo elettrico applicato mostrare una pendenza inferiore e quindi, in quel tratto della caratteristica, un n superiore. Ovviamente ogni materiale mostrerà questo comportamento in suo caratteristico intervallo di valori che potrà essere più o meno elevato e comunque diverso da materiale a materiale.

4.3.2 Prove di vita elettrica effettuate sul materiale 845/03

In Tab. 4.4 sono riportate le caratteristiche delle prove di vita eseguite sul materiale 845/03.

Tabella 4.4

Caratteristiche delle prove di vita eseguite sul materiale 845/03.

Campo elettrico applicato [kV/mm]	Tipo di prova
143	Senza inversioni
158	Senza inversioni
173	Senza inversioni
161	Con inversioni
165	Con inversioni
174	Con inversioni

Nella Fig. 4.29 è riportato un esempio di distribuzione di Weibull, ottenuta per i risultati relativi alla prova di vita eseguita con inversioni di polarità e con campo elettrico applicato pari a 174kV/mm. Si noti che la distribuzione ottenuta è relativa a cinque soli punti sperimentali invece di sei (numero di provini utilizzati); ciò è dovuto al fatto che nella prova in esame è stata applicata un'elaborazione statistica con censuramento progressivo di un punto (cap. 2).

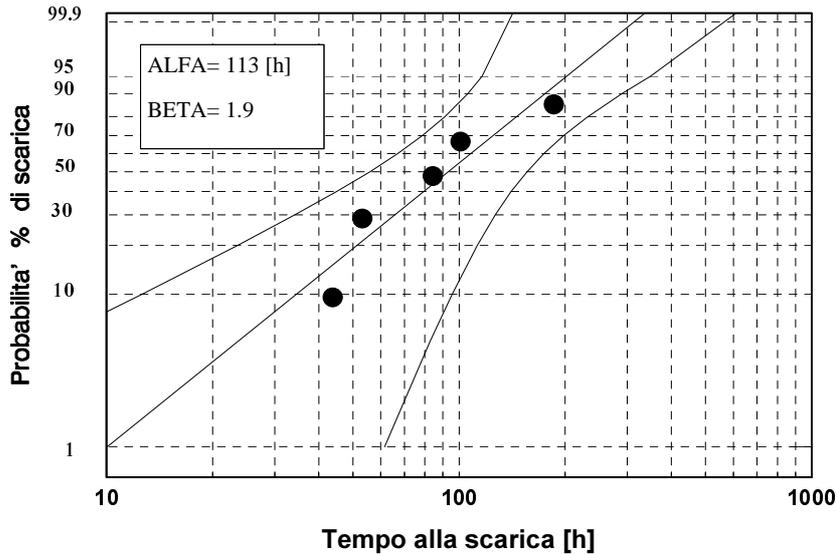


Figura 4.29

Distribuzione di Weibull relativa ai risultati ottenuti nella prova con inversioni e campo elettrico applicato di 174 kV/mm.

I risultati relativi a tutte le prove di vita, eseguite sul materiale 845/03, sono riportati nel diagramma bilogarithmico di Fig. 4.30. Come si può notare, anche in questo caso, i punti sperimentali si allineano abbastanza bene lungo una retta e questo significa che si può utilizzare il modello dell'inversa potenza (cap. 2). Nella Fig. 4.30 è riportato anche il valore del coefficiente di *voltage endurance*, n .

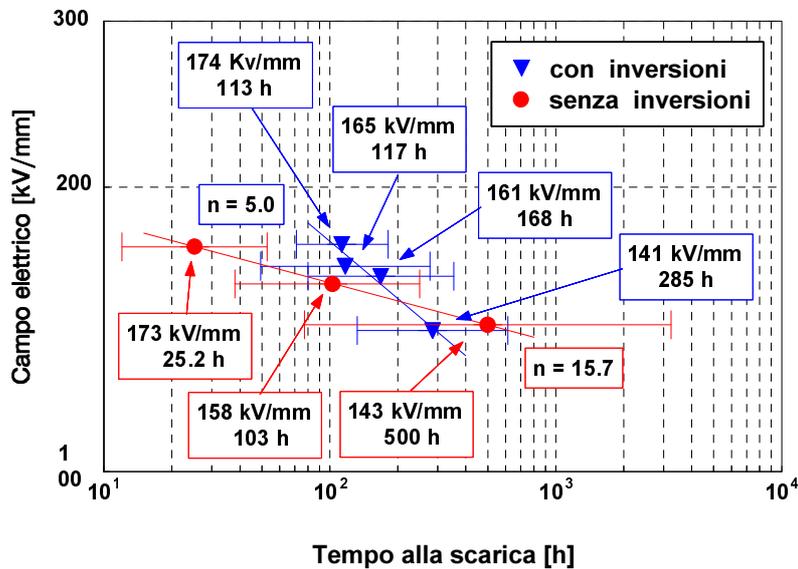


Figura 4.30

Confronto tra le curve di vita con e senza inversioni di polarità del materiale 845/03.

La Fig. 4.30 mette chiaramente in evidenza la peculiarità del materiale 845/03, per il quale, ad alti valori di campo elettrico, le prove di vita con inversione di polarità mostrano una durata

superiore a quella delle prove senza inversioni. La spiegazione di questo fenomeno non è immediata e richiede il contributo di ulteriori informazioni, soprattutto sulla distribuzione di carica spaziale, che possono essere fornite solo da altre tecniche di indagine.

Si deve però notare che la retta di vita relativa alle prove con inversioni presenta un valore di n estremamente basso che limita molto le potenzialità di questo materiale. E' evidente, infatti, che al diminuire del campo elettrico applicato le sue prestazioni decadono rapidamente.

4.3.3 Prove di vita elettrica effettuate sul materiale 845/09

In Tab. 4.5 sono riportate le caratteristiche delle prove di vita eseguite sul materiale 845/09.

Tabella 4.5

Caratteristiche delle prove di vita eseguite sul materiale 845/09.

Campo elettrico applicato [kV/mm]	Tipo di prova
139	Senza inversioni
183	Senza inversioni
244	Senza inversioni
128	Con inversioni
138	Con inversioni
147	Con inversioni
170	Con inversioni

Nella Fig. 4.31 è riportato un esempio di distribuzione di Weibull, ottenuta per i risultati relativi alla prova di vita eseguita con inversioni di polarità e con campo elettrico applicato pari a 128kV/mm.

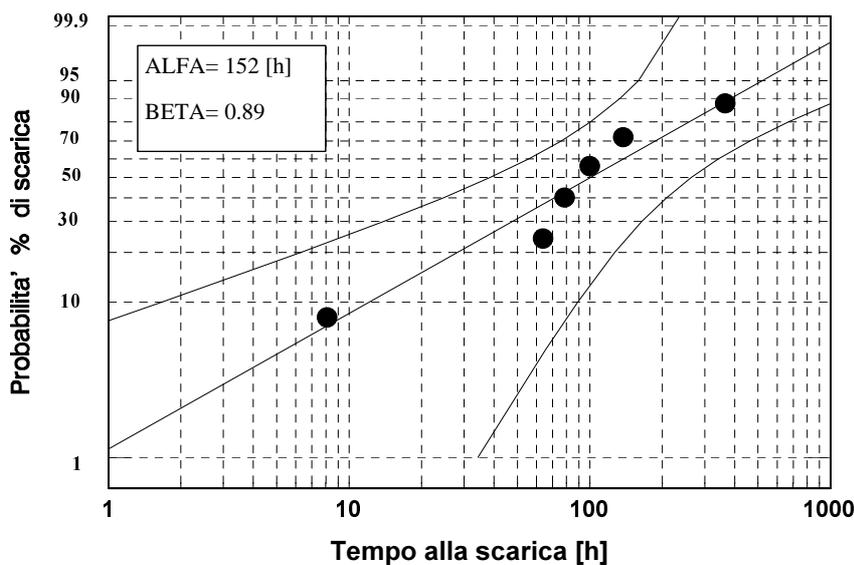


Figura 4.31

Distribuzione di Weibull relativa ai risultati ottenuti nella prova con inversioni e campo elettrico applicato di 128 kV/mm.

I risultati relativi a tutte le prove di vita, eseguite sul materiale 845/09, sono riportati nel diagramma bilogarithmico di Fig. 4.32. Come si può notare, anche in questo caso, i punti sperimentali si allineano lungo una retta. Nella Fig. 4.32 è riportato anche il valore del coefficiente di *voltage endurance*, n .

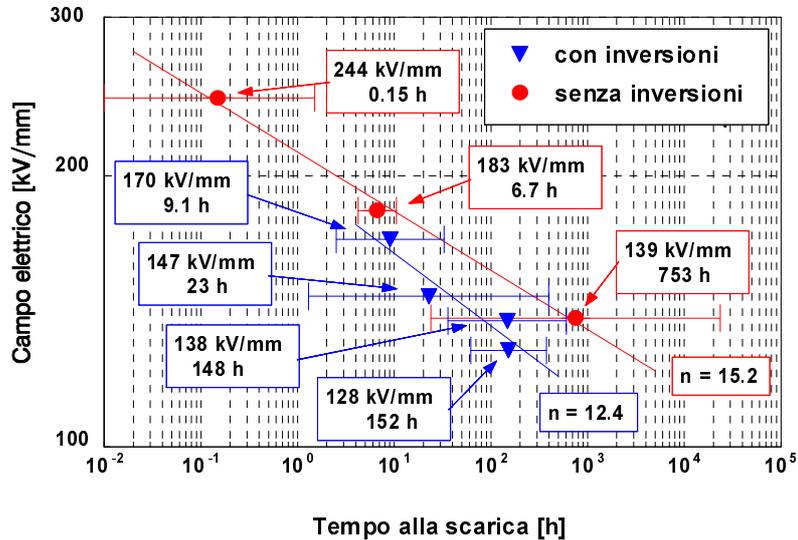


Figura 4.32

Confronto tra le curve di vita con e senza inversioni di polarità del materiale 845/09.

Anche per il materiale 845/09, come per il materiale di riferimento, le prove di vita con inversioni forniscono risultati inferiori a quelli relativi alle prove senza inversioni. L'unica differenza nel comportamento di questo materiale rispetto a quello del riferimento è il valore di n , che, in questo caso, risulta minore per le prove con inversioni rispetto a quelle senza inversioni. Questo comportamento è, comunque, da non considerarsi anomalo; come detto per l'XLPE 845/01, infatti, ogni materiale avrà un proprio intervallo di campo in cui le due caratteristiche tendono a convergere. Fissato un campo di valori di prova, quindi, ci saranno materiali in cui n è maggiore per le prove con inversione (845/01) e materiali in cui n è maggiore per le prove senza inversione (845/09).

4.4 Misure di carica spaziale mediante il metodo PEA

L'utilizzazione della misura della carica spaziale per la qualificazione e la caratterizzazione dei materiali si prefigge diversi obiettivi:

a) la determinazione di un eventuale valore di campo elettrico al di sotto del quale la carica elettrica non rimane intrappolata nel materiale (valore di campo indicato come *soglia di*

intrappolamento), evitando l'azione di degradazione (attraverso l'accumulo di energia elettromeccanica) del materiale stesso;

b) la valutazione dell'effetto dell'inversione di polarità della tensione sull'eventuale evoluzione e distribuzione della carica all'interno del materiale.

4.4.1 Prove PEA per la determinazione della soglia di intrappolamento

Le prove mirate alla valutazione della soglia di intrappolamento avevano come scopo principale quello di valutare la reale capacità del PEA di determinare il valore di campo al di sotto del quale è possibile ritenere trascurabile l'accumulo di carica spaziale nel materiale.

Il campo elettrico ritenuto commercialmente interessante per la produzione di cavi DC con materiale estruso è dell'ordine dei 30kV/mm. Per tale motivo le prove sono state svolte in un intervallo di valori di campo elettrico compreso tra 2 e 60 kV/mm (corrispondente all'intervallo utilizzato anche per le prove di conducibilità). La temperatura scelta per realizzare le prove è 20°C.

Per assicurare la riproducibilità delle prove e, quindi, al fine di rendere possibile il confronto tra i dati ottenuti nelle diverse prove e per i diversi materiali, si è introdotto un protocollo di prova e tutte le misure svolte per la determinazione della soglia di intrappolamento sono state eseguite secondo questo protocollo. Il campo elettrico viene applicato ai campioni per un periodo pari a 100000s, trascorso il quale si imposta a zero il valore di tensione fornito dal generatore HVDC permettendo in questo modo il defluire della carica attraverso l'impedenza d'ingresso del generatore stesso (la quale è trascurabile rispetto alla resistenza del provino). La Fig. 4.33 mostra il diagramma schematico del protocollo di prova utilizzato.

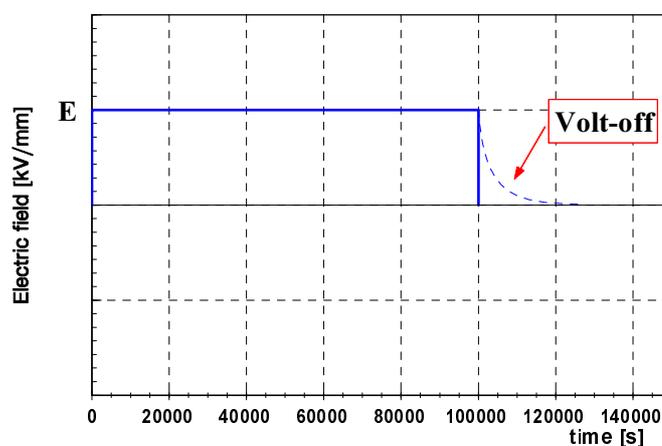


Figura 4.33

Diagramma schematico della prova standardizzata per la determinazione della soglia elettrica dei materiali isolanti provati.

Questa procedura consente di osservare sia la dinamica della carica durante l'applicazione del campo elettrico sia la rapidità con cui i materiali drenano la carica accumulata nel corso della prova. Il programma realizzato per l'elaborazione dei dati consente, infatti, la determinazione del valore assoluto della carica elettrica contenuta all'interno del provino (par. 3.4.2).

Per ogni valore di campo elettrico applicato è stato determinato, tramite tale programma, il valore medio della carica, in valore assoluto, intrappolata al termine del periodo di applicazione del campo elettrico o, in altre parole, il valore della carica media intrappolata all'istante t_0 di inizio della Volt-off. Questo valore di carica rappresenta quantitativamente la carica che complessivamente si è accumulata all'interno del materiale durante l'applicazione del campo elettrico. Considerando il valore assoluto della carica netta è possibile evitare che accumuli di segno opposto si elidano nel calcolo della media, dando origine a valutazioni errate della quantità di carica presente nel materiale. La valutazione della grandezza appena introdotta è fatta dal programma di elaborazione sfruttando la seguente relazione:

$$Q_{VO}(t_0) = \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} Abs[Q(x, t_0)] dx \quad (4.1)$$

dove con $Q_{VO}(t_0)$ si è indicata la carica media accumulata (come sopra definita), con $Q(t_0, x)$ la distribuzione di carica all'istante (t_0) in cui inizia la Volt-off e con x_0 e x_1 le posizioni dei due elettrodi (la carica immagine indotta sugli elettrodi non è presa in considerazione nel il calcolo).

Il diagramma ottenuto riportando i valori di carica accumulata così ottenuti, in funzione del corrispondente campo elettrico applicato fornisce, quindi, l'andamento della carica accumulata in funzione del campo elettrico e permette di valutare il valore limite oltre il quale si ha formazione di carica spaziale cioè, in definitiva, il valore della sopracitata soglia di intrappolamento.

4.4.1.1 Determinazione della soglia di intrappolamento dell'XLPE 845/01

A titolo d'esempio sono riportati integralmente i dati relativi alle prove svolte per la determinazione dell'eventuale soglia di intrappolamento per il materiale di riferimento, cioè per l'XLPE 845/01. Per i restanti materiali sarà riportato, invece, solo il grafico riassuntivo dell'andamento della carica accumulata in funzione del campo elettrico.

I campi elettrici utilizzati per la caratterizzazione dell'XLPE 845/01 sono: 5.3, 12, 16, 40 e 60kV/mm. Nelle Fig. 4.34-4.38 sono rappresentati i risultati delle singole prove eseguite. Per ogni figura la parte (a) mostra l'andamento della carica in funzione della posizione nel campione (tipico diagramma di PEA) per diversi istanti della prova. La parte (b) è analoga alla precedente

ma si riferisce all'andamento del campo elettrico reale. La parte (c), infine, riporta (solo per le prove eseguite con 12, 16, 40, 60kV/mm) il grafico a colori (*pattern*) della carica accumulata nel provino (Cap. 3). La scala cromatica relativa al pattern e il corrispondente abbinamento colori-valore di carica può essere ottenuto utilizzando la legenda dei colori riportata in Fig. 3.36, associando il valore di carica riportato nella didascalia di ognuna delle figure alla classe di colore massima.

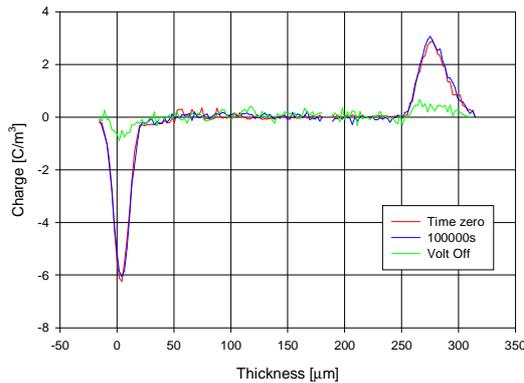


Figura 4.34 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 5.3kV/mm a 20°C.

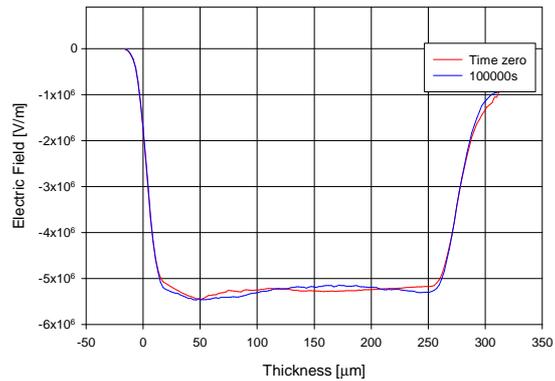


Figura 4.34 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 5.3kV/mm a 20°C.

Nella Fig. 4.34 (a) si può notare che non vi è accumulo di carica spaziale all'interno del provino durante l'applicazione del campo elettrico; di conseguenza il campo elettrico reale non presenta sostanziali distorsioni rispetto a quello ideale laplaciano (Fig. 3.34 (b)).

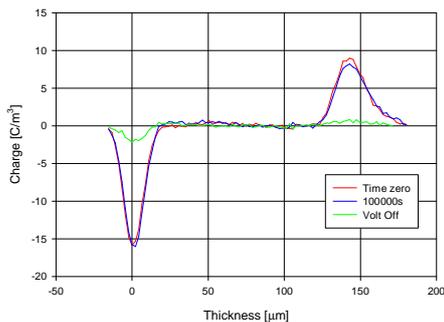


Figura 4.35 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 12kV/mm a 20°C.

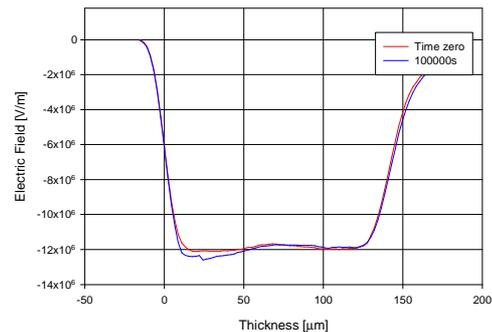


Figura 4.35 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 12kV/mm a 20°C.

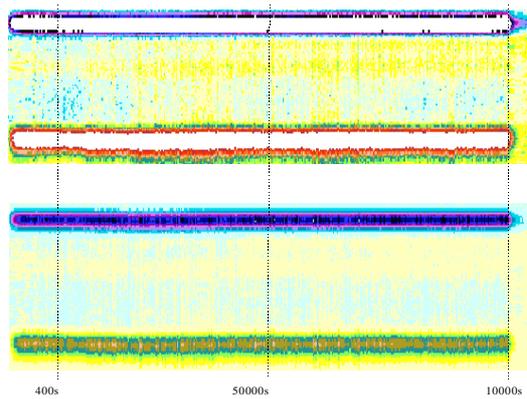


Figura 4.35 (c)

Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno di un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 12kV/mm a 20°C. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $5C/m^3$, mentre il secondo adottando $19C/m^3$.

Le Fig. 4.35 (a) e 4.35 (c) mostrano un leggerissimo accumulo di eterocarica al catodo. Ciò provoca una lieve distorsione dell'andamento del campo elettrico rispetto a quello laplaciano. La Fig. 4.35 (b) mostra, in effetti, un piccolo incremento del campo elettrico all'interfaccia con l'elettrodo di alluminio.

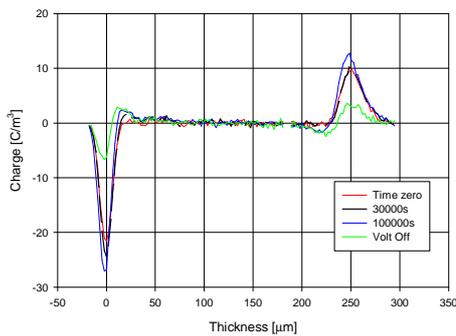


Figura 4.36 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 16kV/mm a 20°C.

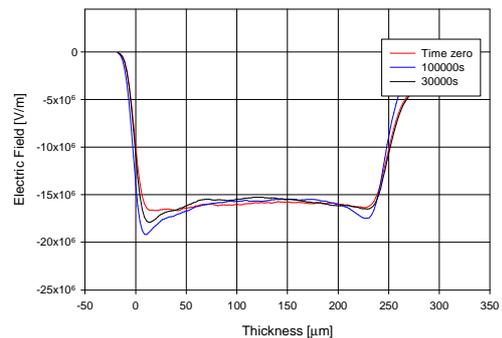


Figura 4.36 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 16kV/mm a 20°C.

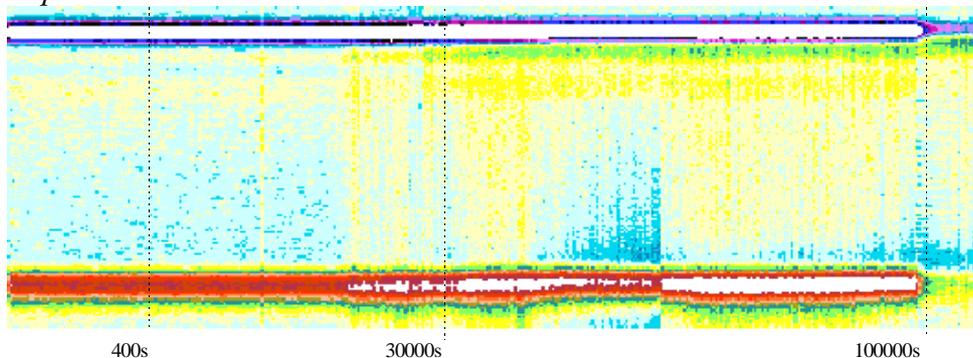


Figura 4.36 (c)

Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno di un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 16kV/mm a 20°C. IL grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $10C/m^3$.

Le Fig. 4.36 (a) e 4.36 (c) mostrano chiaramente un accumulo di eterocarica vicino agli elettrodi. La Fig. 4.36 (b) mostra la distorsione del campo elettrico (rafforzamento del campo elettrico in corrispondenza delle interfacce con gli elettrodi ed indebolimento all'interno del materiale).

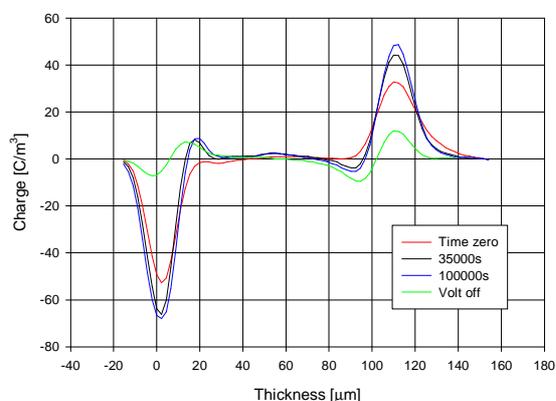


Figura 4.37 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 40kV/mm a 20°C.

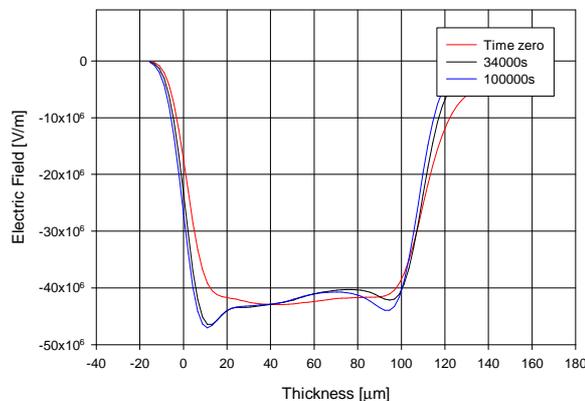


Figura 4.37 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 40kV/mm a 20°C.

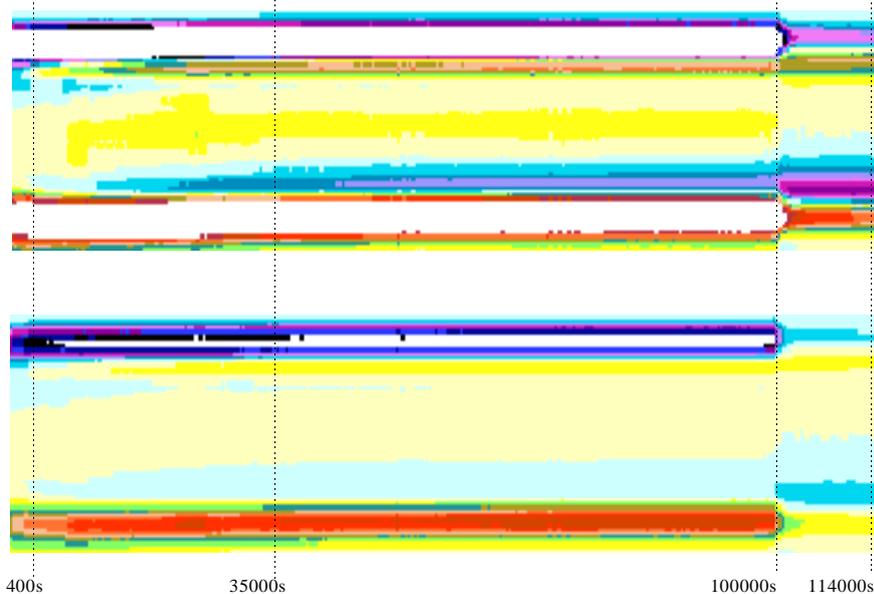


Figura 4.37 (c)

Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno di un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 40kV/mm a 20°C. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 15C/m³, mentre il secondo adottando 55C/m³.

Il comportamento dell'XLPE testato a 40kV/mm, presenta formazione di eterocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.37 (a) e (c)). Tale comportamento risulta evidente nella Fig. 4.37 (b), ove si riscontra una diminuzione del campo elettrico al centro del provino ed un aumento alle interfacce.

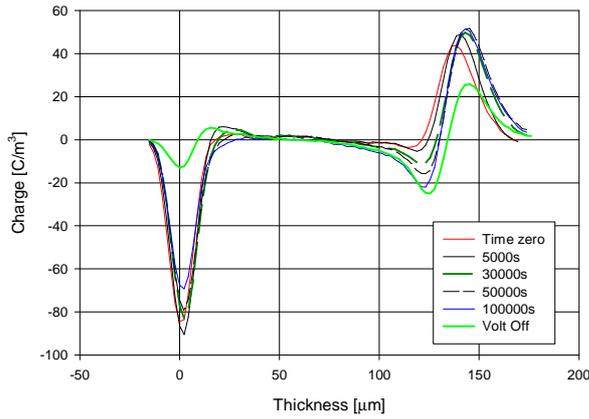


Figura 4.38 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 60kV/mm a 20°C.

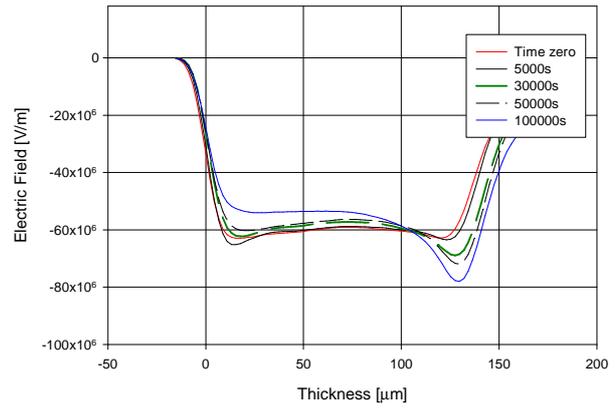


Figura 4.38 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 60kV/mm a 20°C.

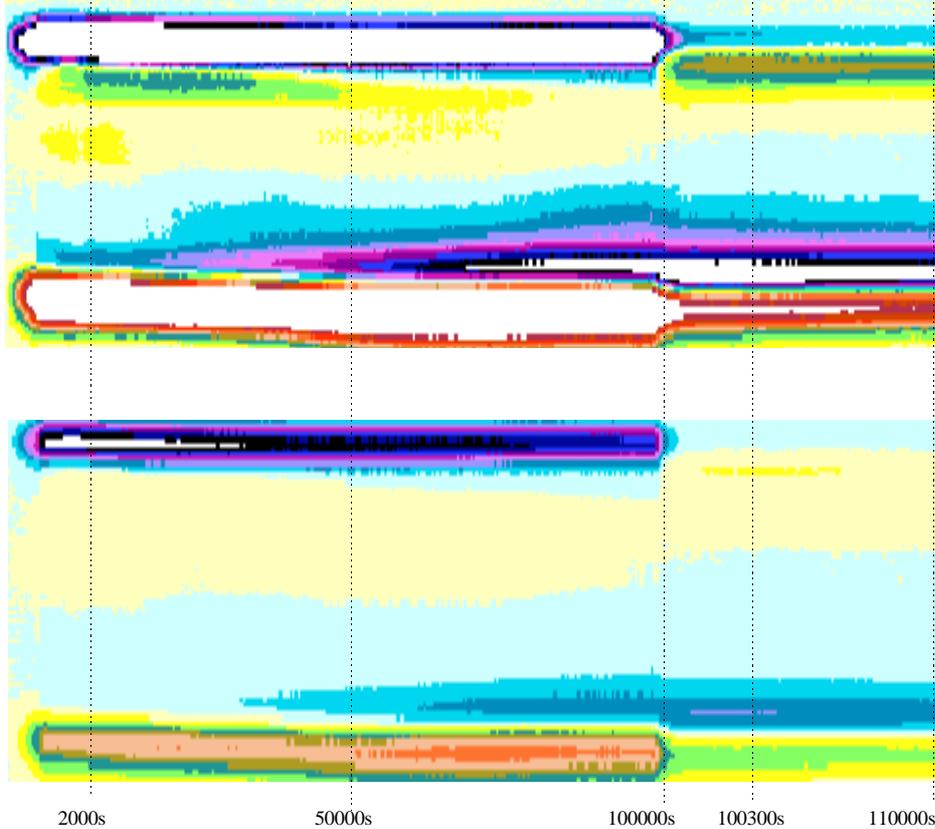


Figura 4.38 (c)

Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno di un campione di XLPE 845/01 sottoposto a 60kV/mm a 20°C. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 20C/m³, mentre il secondo adottando 90C/m³.

Il comportamento dell'XLPE testato a 60kV/mm presenta la formazione di eterocarica vicino agli elettrodi durante i primi 5000 e la successiva iniezione di elettroni dal catodo, Fig. 4.38 (a) e 4.38 (c). Tale comportamento risulta evidente nella Fig. 4.38 (b), ove si riscontra una diminuzione del campo elettrico all'interfaccia con il catodo dopo i primi 5000s.

Nella Fig. 4.39 è, infine, mostrata la caratteristica carica accumulata-campo elettrico (Q_0 -E) ottenuta dai risultati appena esposti. Tale caratteristica evidenzia la presenza di una soglia di intrappolamento il cui valore è approssimativamente di 14kV/mm.

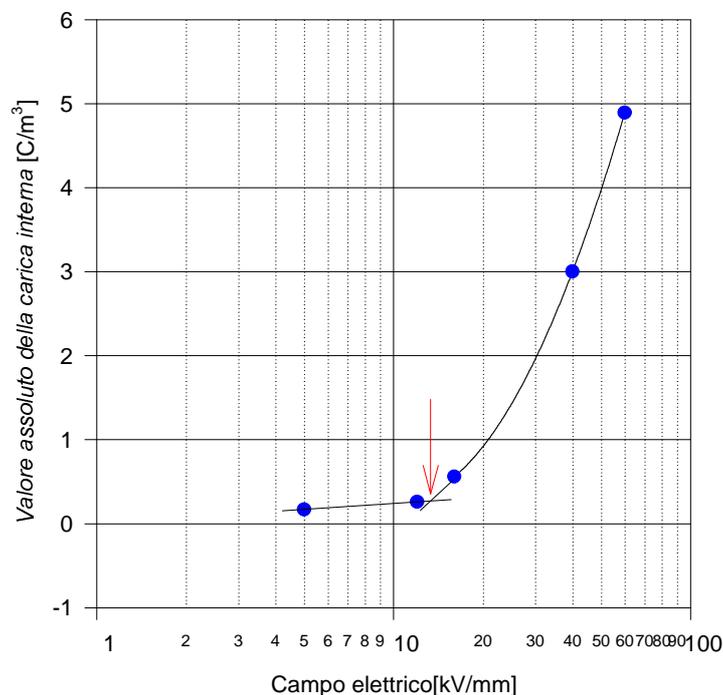


Figura 4.39

Caratteristica carica – campo elettrico dell'XLPE 845/01 testato a 20°C.

La carica spaziale accumulata risulta essere principalmente eterocarica. Con un campo elettrico di prova pari a 5.5kV/mm non si riscontra alcun accumulo di carica all'interno del materiale. Con 12kV/mm si osserva un debole accumulo di carica positiva al catodo. Per valori di campo elettrico compresi tra 16 e 42kV/mm si osserva un accumulo di eterocarica vicino agli elettrodi. La densità della carica accumulata aumenta con l'incremento del campo elettrico applicato. Con un campo di prova di 60kV/mm si riscontra la formazione di eterocarica su entrambi gli elettrodi durante i primi 5000s di prova. In seguito si nota l'iniezione di omocarica dal catodo. Ciò indica chiaramente l'attivazione di processi elettrodiici al catodo.

Tali rilevazioni hanno permesso la determinazione della soglia elettrica dell'XLPE: 14kV/mm. Per valori di campo inferiori si può ritenere che non vi sia accumulo di carica e quindi si può ritenere trascurabile o nullo l'effetto dell'invecchiamento sul materiale. Purtroppo tale soglia risulta troppo bassa per essere economicamente vantaggiosa.

4.4.1.2 Determinazione della soglia di intrappolamento del materiale 845/03

I campi elettrici adottati per la caratterizzazione del materiale 845/03 sono: 4, 8.6, 12, 25, 40 e 60kV/mm.

Nella prova a 4kV/mm non si riscontra formazione di carica spaziale nel materiale. Conseguentemente il campo elettrico reale non presenta una sostanziale distorsione rispetto a quello laplaciano, Fig. 4.40.

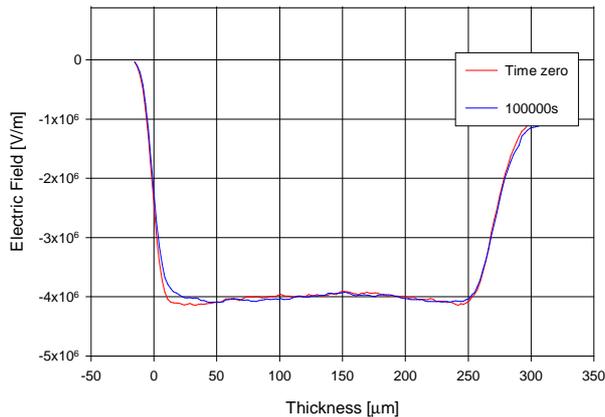


Figura 4.40

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 4kV/mm a 20°C.

Nella prova a 8.6kV/mm si è manifestata una leggera iniezione di omocarica dal catodo. Data la bassa carica iniettata, la distorsione del campo risulta ancora estremamente limitata.

La dinamica di carica nella prova a 12kV/mm è simile alla precedente (iniezione di omocarica dal catodo). Si osserva un aumento della densità di omocarica accumulata vicino all'elettrodo negativo (Fig. 4.41).

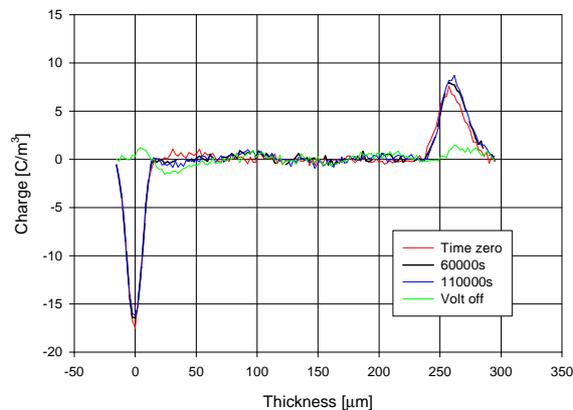


Figura 4.41

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 12kV/mm a 20°C

La Fig. 4.42 (a), relativa alla prova con 26kVmm, mostra un accumulo di eterocarica ad entrambi gli elettrodi. Nella Fig. 4.42 (b) è mostrato l'effetto di tale eterocarica sull'andamento del campo elettrico.

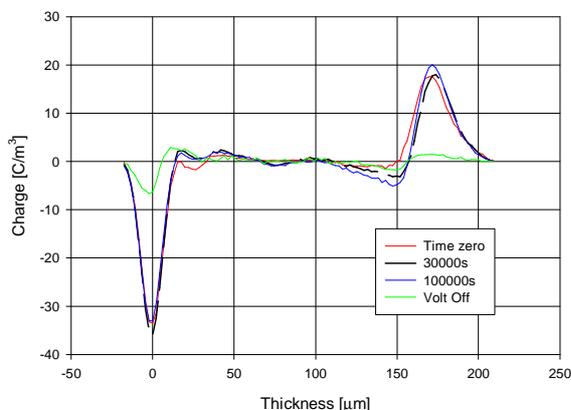


Figura 4.42 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 26kV/mm a 20°C.

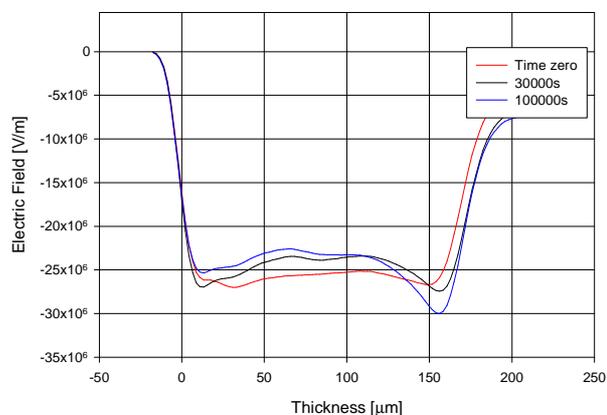


Figura 4.42 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 26kV/mm a 20°C.

Nella Fig. 4.43, relativa alla prova con campo elettrico pari a 40 kV/mm, si evidenzia la formazione di eterocarica nei pressi di entrambi gli elettrodi durante i primi 20000s. Dopo questo periodo si osserva l'iniezione di omocarica dal catodo mentre all'anodo prosegue l'accumulo di eterocarica. La Fig. 4.43 (b) evidenzia l'aumento dell'intensità del campo elettrico al catodo durante i primi 20000s (in corrispondenza dell'accumulo di eterocarica) e la successiva riduzione dello stesso per via dell'iniezione di omocarica.

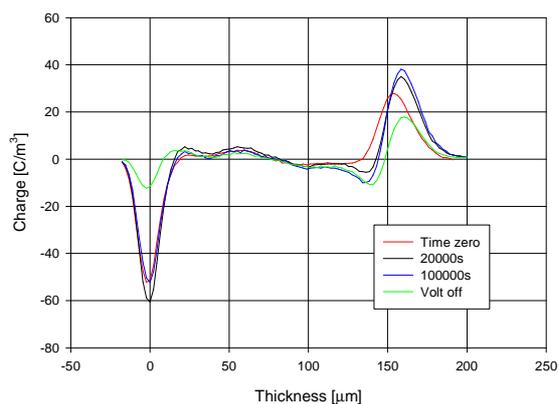


Figura 4.43 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 40kV/mm a 20°C.

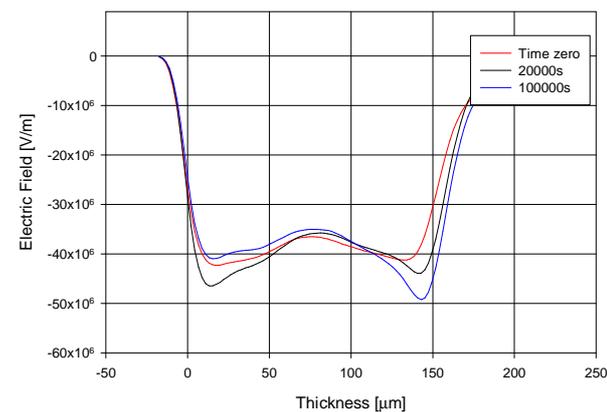


Figura 4.43 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 40kV/mm a 20°C.

Con un campo di prova pari a 60kV/mm inizialmente si ha la formazione di eterocarica al catodo. In seguito, invece, si osserva la formazione di eterocarica all'anodo e l'iniezione di

omocarica dal catodo. I portatori di carica negativa, iniettati dall'elettrodo negativo, sembrano provocare la neutralizzazione di parte della carica positiva presente, con una conseguente diminuzione del campo elettrico presente all'interfaccia (Fig. 4.44 (a) e (b)).

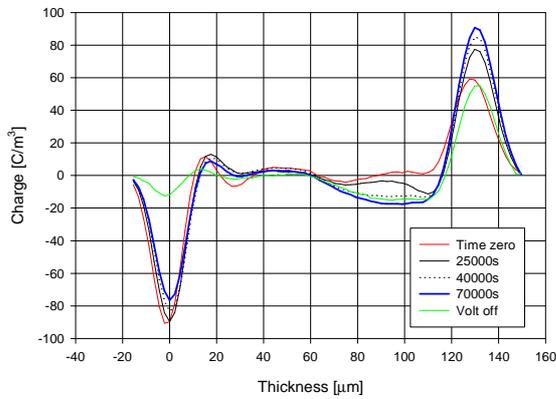


Figura 4.44 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 60kV/mm a 20°C.

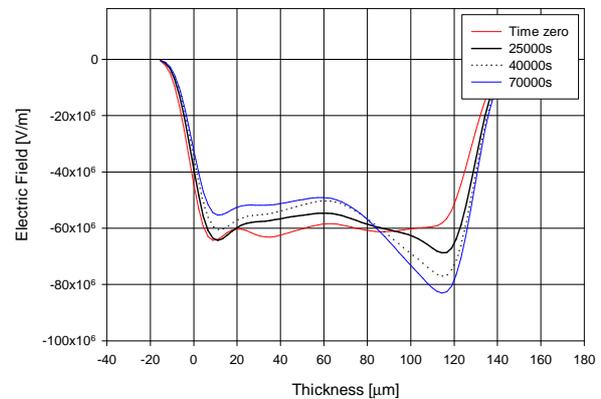


Figura 4.44 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di XLPE 845/03 sottoposto a 60kV/mm a 20°C.

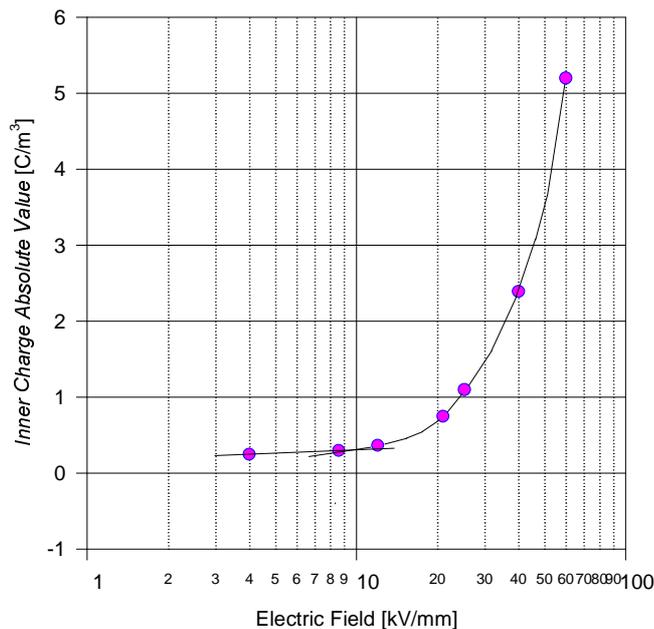


Figura 4.45

Caratteristica carica - campo dell'XLPE 845/03 testato a 20°C.

Nella Fig. 4.45 è riportato l'andamento riassuntivo della caratteristica carica-campo (Q_0 -E). Confrontando tale andamento con quello dell'XLPE 845/01 risulta assai difficile determinare differenze rilevanti, anche se l'evoluzione delle singole prove potrebbe far pensare che per il materiale additivato il valore di campo oltre il quale si ha accumulo di carica è leggermente inferiore rispetto a quello dell'XLPE. Per valori di campo superiori a 9kV/mm, infatti, nel

materiale 845/03 si osserva una carica leggermente superiore a quella dell'XLPE 845/01. L'andamento della caratteristica Q-E dello 845/03 non si discosta da quello della caratteristica dell'XLPE 845/01 in maniera tale da poter ipotizzare una reale variazione della soglia (che comunque sarebbe nella direzione indesiderata di una diminuzione del suo valore).

La tecnica utilizzata permette comunque di dire che l'additivo impiegato non rappresenta una scelta valida per aumentare la soglia elettrica del materiale (si osservi che questo risulta coincidere con quello ottenuto per le prove di conducibilità).

4.4.1.3 Determinazione della soglia di intrappolamento del materiale P5

I campi elettrici adottati per caratterizzare il materiale P5 sono: 2, 4, 7, 10 e 25kV/mm.

Le prove effettuate con 2 e 4 kV/mm non hanno manifestato formazione di carica spaziale all'interno del provino, quindi il campo elettrico non presenta distorsioni rispetto a quello laplaciano.

Nella prova a 7 kV/mm si è riscontrata una iniezione di omocarica dall'anodo (Fig. 4.46). Ciò provoca una diminuzione del campo elettrico all'elettrodo positivo ed un suo aumento all'interno del provino.

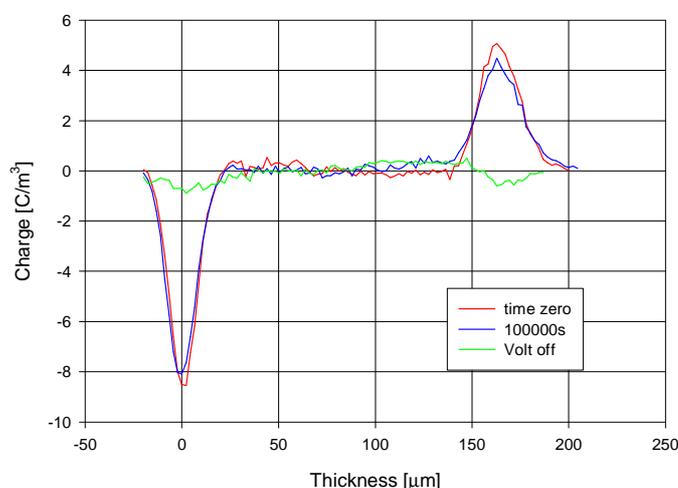


Figura 4.46

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di P5 sottoposto a 7kV/mm a 20°C

La Fig. 4.47 (a) si riferisce alla prova a 10kV/mm. Essa mostra la formazione di omocarica all'anodo. Durante l'applicazione del campo elettrico tale carica positiva si distribuisce all'interno del campione richiamando carica negativa sul catodo. Nella Fig. 4.47 (b) è riportato il conseguente andamento del campo elettrico.

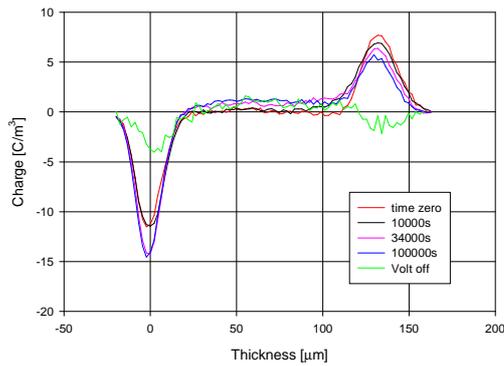


Figura 4.47 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di P5 sottoposto a 10kV/mm a 20°C.

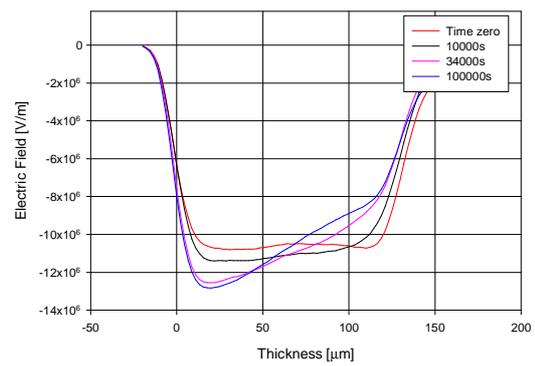


Figura 4.47 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di P5 sottoposto a 10kV/mm a 20°C.

La Fig. 4.48 (a) mostra il comportamento del materiale sollecitato da un campo elettrico pari a 25kV/mm. In essa si può notare una iniziale iniezione di omocarica dall’anodo seguita da una progressiva distribuzione della carica all’interno del materiale (con conseguente richiamo di elettroni al catodo). Trascorsi i primi 5000s il campo (vicino al catodo) raggiunge un valore sufficientemente elevato (35kV/mm, Fig. 4.48(b)) per attivare l’elettrodo negativo con una conseguente iniezione di elettroni. La carica iniettata dal catodo neutralizza la carica positiva presente nelle vicinanze dell’elettrodo e l’effetto risulta visibile dopo 90000s con l’abbassamento del campo elettrico vicino al catodo, Fig. 4.48 (b).

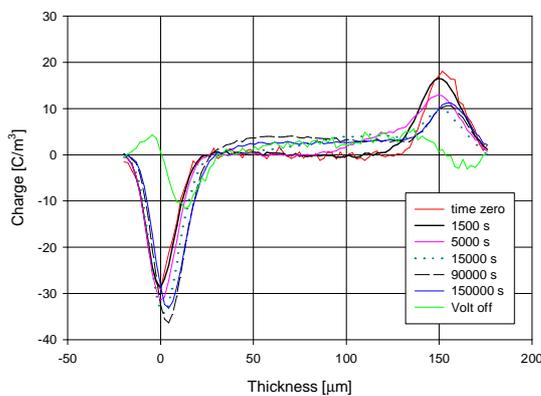


Figura 4.48 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione di P5 sottoposto a 25kV/mm a 20°C.

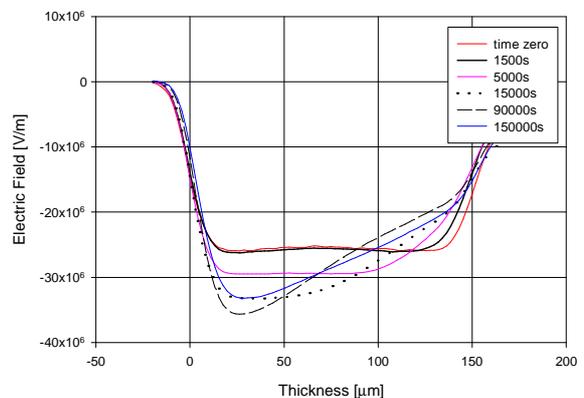
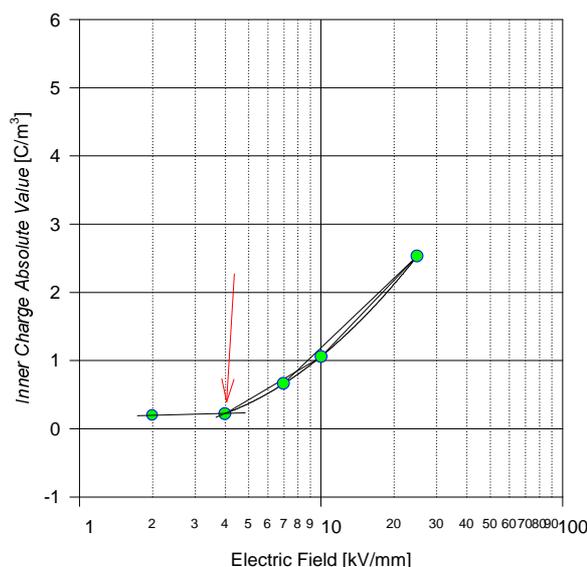


Figura 4.48 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione di P5 sottoposto a 25kV/mm a 20°C.

Nella Fig. 4.49 è riportata infine la caratteristica carica-campo del materiale P5. Da tale caratteristica è possibile estrapolare un valore della soglia di intrappolamento di circa 5kV/mm.

***Figura 4.49***

Caratteristica carica - campo del P5 testato a 20°C

Il comportamento del P5 è caratterizzato da una iniezione di omocarica dall'anodo a partire da 4 kV/mm. Al crescere del campo applicato aumenta la densità di omocarica iniettata dall'elettrodo positivo, la quale tende a distribuirsi progressivamente all'interno del materiale richiamando elettroni al catodo. Con un campo di prova di 25kV/mm si osserva una iniezione di omocarica da parte del catodo. Tale elettrodo si attiva in seguito all'intensificarsi del campo elettrico all'interfaccia col catodo (aumento dovuto alla progressiva distorsione a cui è sottoposto per via della carica positiva iniettata).

L'additivo utilizzato peggiora, quindi, le prestazioni del materiale rispetto al riferimento.

4.4.1.4 Determinazione della soglia di intrappolamento dell'XLPE A

I campi elettrici adottati per la caratterizzazione dell'XLPE A (che è un XLPE puro ma diverso dal riferimento 845/01) sono: 4, 30, 40, 50, e 70kV/mm. Per questo materiale si è voluta testare la possibilità di velocizzare le misure effettuando prove della durata di 3000s.

Nelle prove a 4 e 30 kV/mm non si è manifestata formazione di carica all'interno del materiale, quindi il campo elettrico non presenta distorsioni rispetto a quello laplaciano (Fig. 4.50).

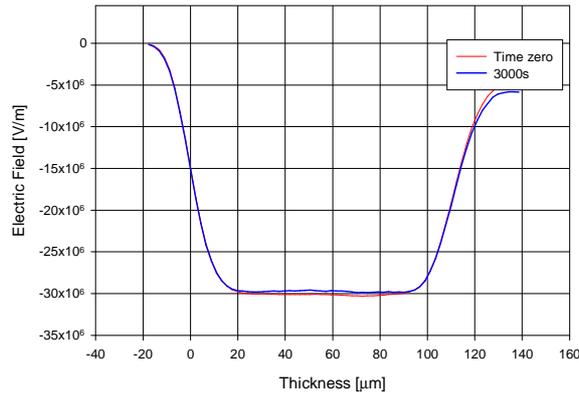


Figura 4.50

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione dell'XLPE A sottoposto a 30kV/mm a 20°C

Durante le prove a 40, 50 e 70 kV/mm si è riscontrata la formazione di un accumulo di eterocarica agli elettrodi, crescente con l'aumentare del campo elettrico di prova. Le Fig. 4.51 e 4.52 (a) si riferiscono rispettivamente alla prova a 40 kV/mm e a quella a 70 kV/mm. Nella Fig. 4.52 (b) è riportato l'andamento del campo elettrico relativo alla prova a 70 kV/mm.

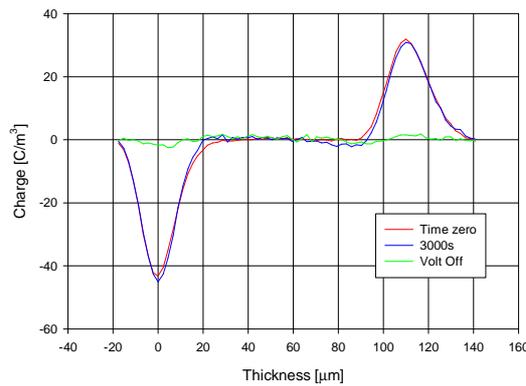


Figura 4.51

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione dell'XLPE A sottoposto a 40kV/mm a 20°C

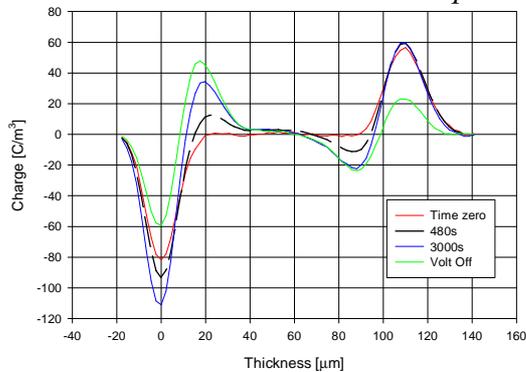


Figura 4.52 (a)

Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica spaziale in un campione dell'XLPE A sottoposto a 70kV/mm a 20°C.

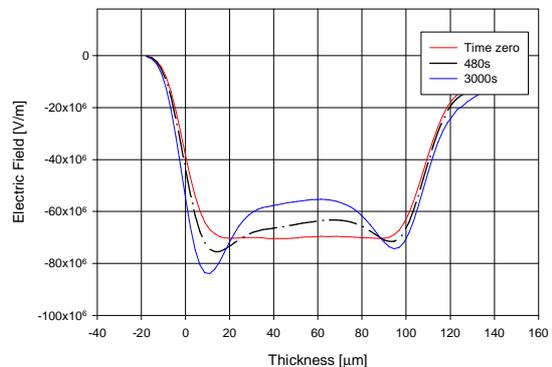


Figura 4.52 (b)

Dipendenza dal tempo del campo elettrico in un campione dell'XLPE A sottoposto a 70kV/mm a 20°C.

Nella Fig. 4.53 è riportata la caratteristica carica-campo dell'XLPE A. Da tale caratteristica si è determinato il valore della soglia elettrica che risulta essere 35kV/mm.

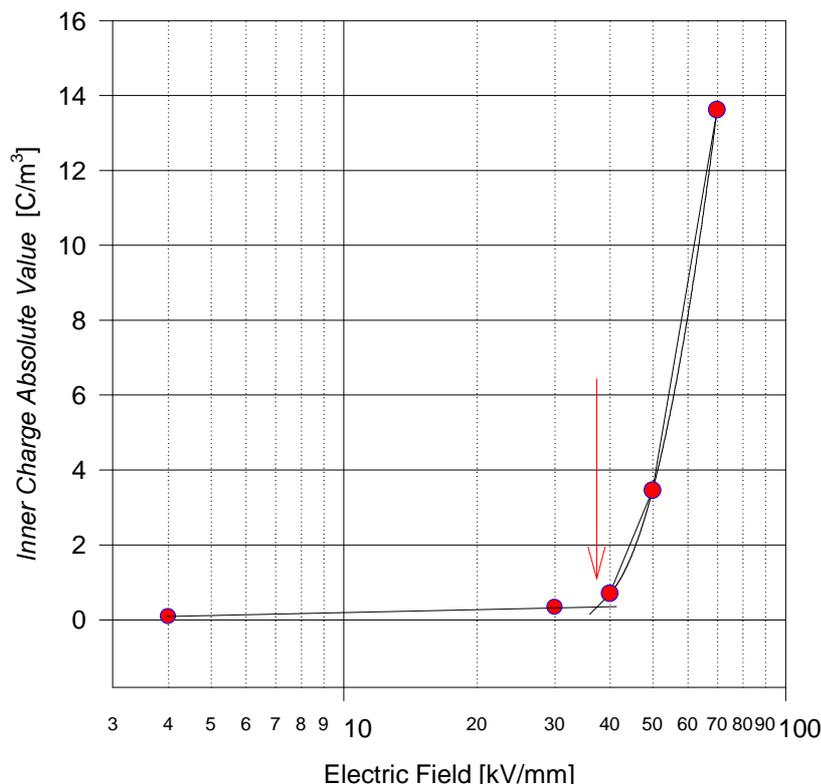


Figura 4.53

Caratteristica carica - campo dell'XLPE A testato a 20°C.

La carica spaziale accumulata nell'XLPE A risulta essere principalmente eterocarica. Con campi elettrici di prova inferiori a 30kV/mm non si riscontra accumulo di carica all'interno del materiale. Con 40kV/mm si osserva un debole accumulo di carica positiva al catodo. Per valori di campo elettrico superiori a 40kV/mm si osserva eterocarica vicino agli elettrodi. La densità della carica accumulata aumenta con l'incremento del campo elettrico applicato. Non si è riscontrata una attivazione dei processi elettrodici.

Tali rilevazioni hanno permesso la determinazione della soglia elettrica dell'XLPE A a 35kV/mm, valore decisamente superiore rispetto agli altri materiali testati e notevolmente interessante per applicazioni in cavo.

4.4.2 Prove PEA per la determinazione dell'effetto dell'inversione di polarità sulla distribuzione della carica spaziale

Lo scopo delle prove qui illustrate è quello di valutare l'effetto dell'inversione di polarità della tensione applicata al materiale sulla carica distribuita al suo interno.

Per avere la certezza della riproducibilità e della confrontabilità dei dati ottenuti, le prove sono state effettuate rispettando un protocollo tale da assicurare sempre le medesime condizioni sperimentali (Fig. 4.54).

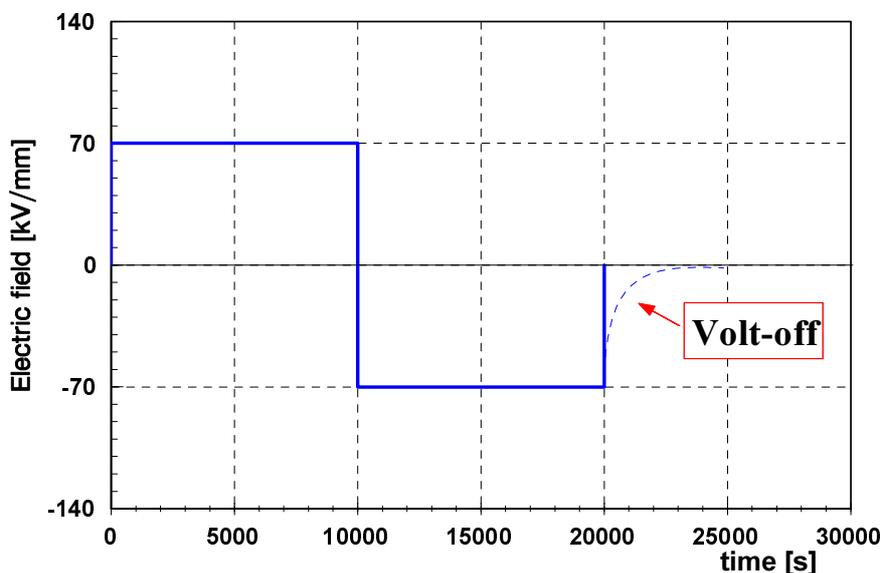


Figura 4.54

Diagramma schematico della prova standardizzata con inversione di polarità.

Le prove sono state eseguite ad un solo valore di campo elettrico: 70kV/mm; questa condizione assicura il raggiungimento del regime di carica in tempi brevi (8000-9000s). Conseguentemente il tempo di carica adottato è di 10000s prima dell'inversione di polarità, e di altri 10000s dopo l'inversione (Fig. 4.54).

Arrivati a 20000s dall'inizio della prova si imposta a zero la tensione erogata dal generatore HVDC. Questa operazione consente l'osservazione della dinamica con cui il materiale espelle la carica accumulata nel corso della prova. L'intervallo temporale in cui si acquisiscono i dati con il generatore impostato a zero (*volt off*) è di 10000s. Le rilevazioni effettuate durante la *volt off* consentono la realizzazione di una caratteristica carica-tempo; i valori di carica (espressi in C/m^3) vengono dedotti attraverso l'opzione del programma di elaborazione *inner charge* (par. 3.4.2) nello stesso modo utilizzato per determinare la caratteristica carica-campo nei dati esposti nel precedente paragrafo (in quel caso però era valutata la carica al solo istante (t_0) successivo alla eliminazione della tensione di alimentazione).

La temperatura adottata durante l'esecuzione di queste prove è ancora di 20°C.

Nelle figure seguenti sono rappresentati i risultati delle prove eseguite su diversi materiali. Volendo esporre i dati ottenuti dal PEA nel modo classico si dovrebbe riportare una serie di andamenti carica-posizione e campo-posizione (a titolo d'esempio questo è stato fatto per il

materiale di riferimento). A causa della grande quantità di materiali in esame, però, ciò risulta controproducente, soprattutto perché questa enorme quantità di grafici renderebbe virtualmente impossibile fare un razionale confronto tra più di due materiali contemporaneamente. A quanto detto si deve aggiungere che un confronto fra materiali, fatto sulla base dei diagrammi riportanti l'evoluzione della distribuzione della carica e del campo in funzione del tempo, risulterebbe solo qualitativa, non fornendo in realtà dei veri parametri per un confronto univoco e quantitativo. Per questo motivo, al fine di rappresentare in maniera quanto più possibile completa e concisa il suo comportamento, per ogni materiale sono riportati solo tre diagrammi, che vogliono riassumere le informazioni altrimenti distribuite su molti più grafici. In particolare sono riportati:

- il grafico a colori (*pattern*) della carica accumulata nel provino durante la prova. (L'interpretazione del *pattern* si effettua mediante la legenda dei colori riportata in Fig. 3.36);
- L'andamento, nel corso della prova, del valore massimo del campo elettrico ottenuto in ogni istante all'interno del campione testato;
- La caratteristica carica interna-tempo durante la Volt-off. In questo grafico la carica interna è riportata in valore relativo rispetto a quella ($Q_{VO}(t_0)$, eq. (4.1)) presente all'istante t_0 ed è calcolata dal programma di elaborazione sfruttando la seguente relazione:

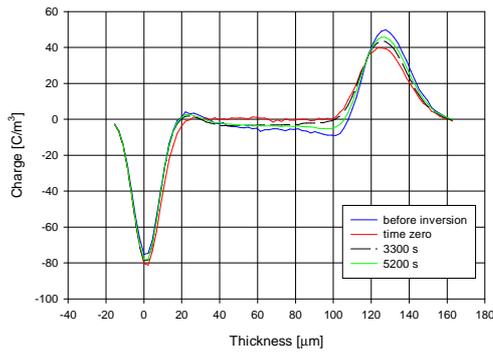
$$Q_{VO}(t) = \frac{1}{Q_{VO}(t_0)(x_1 - x_0)} \int_{x_0}^{x_1} Abs[Q(x, t)] dx \quad (4.1)$$

dove con $Q_{VO}(t)$ si è indicata la carica media accumulata (come sopra definita), con $Q(t, x)$ la distribuzione di carica all'istante t della Volt-off e con x_0 e x_1 le posizioni dei due elettrodi (la carica immagine indotta sugli elettrodi non è presa in considerazione nel il calcolo).

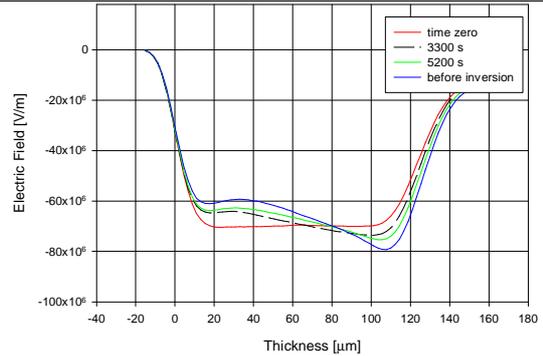
Come precedentemente detto, per l'XLPE 845/01, materiale di riferimento, sono riportati anche i diagrammi che mostrano l'evoluzione nel tempo della distribuzione di carica (che per gli altri materiali è riassunta nel pattern) e del profilo del campo elettrico.

4.4.2.1 Prova con inversione di polarità sull'XLPE 845/01

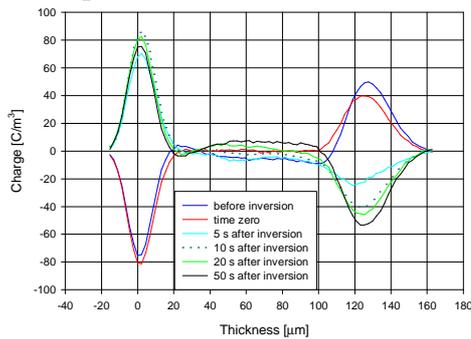
Nella Fig. 4.55 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sull'XLPE 845/01 di riferimento.



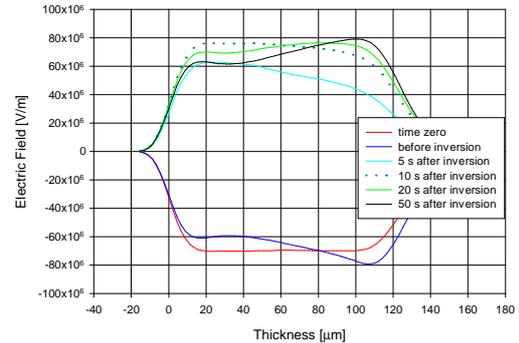
(a): Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica elettrica prima dell'inversione di polarità della tensione.



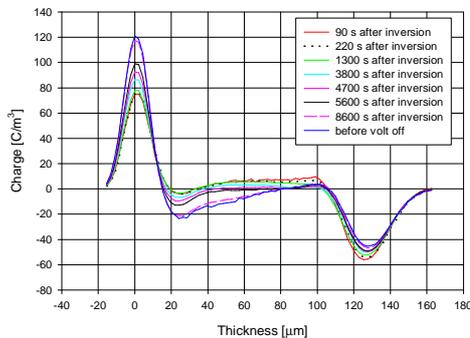
(b): Dipendenza dal tempo del campo elettrico prima dell'inversione di polarità della tensione.



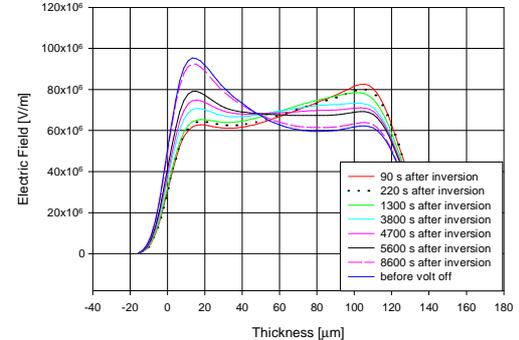
(c): Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica elettrica durante l'inversione di polarità.



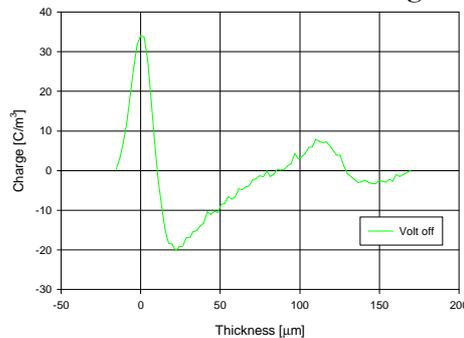
(d): Dipendenza dal tempo del campo elettrico durante l'inversione di polarità della tensione.



(e): Dipendenza dal tempo della distribuzione di carica elettrica dopo l'inversione di tensione e prima dell'impostazione a zero del generatore di tensione.

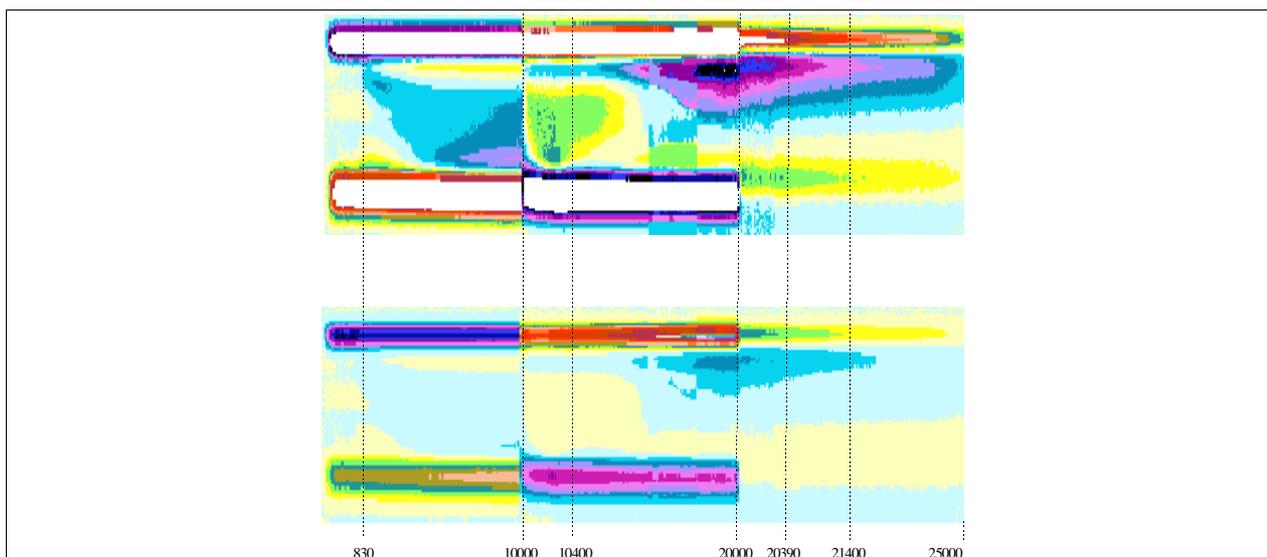


(f): Dipendenza dal tempo della distribuzione di campo elettrico dopo l'inversione di tensione e prima dell'impostazione a zero del generatore di tensione.

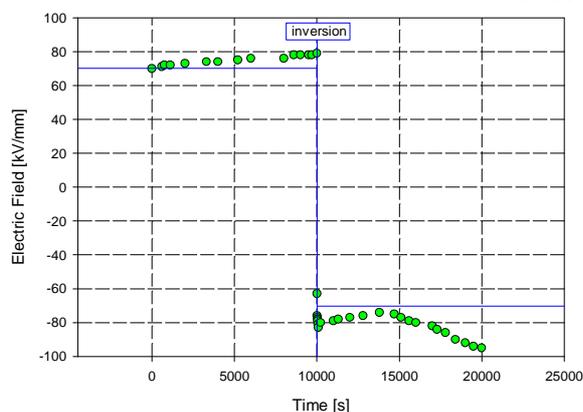


(g): Carica elettrica accumulata nell'istante successivo allo spegnimento del generatore HVDC.

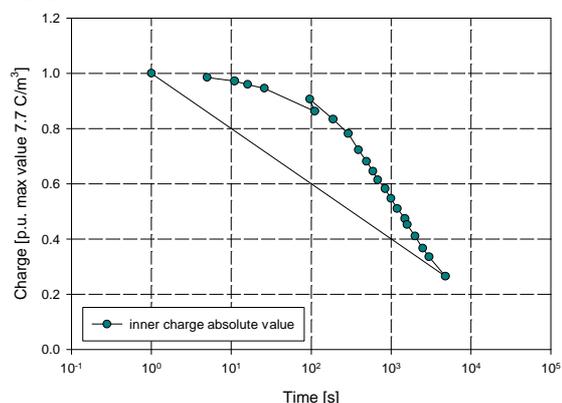
Figura 4.55 segue



(h): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $20C/m^3$, mentre il secondo adottando $100C/m^3$.



(i): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico all'interno del campione.



(l): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.55

Diagrammi relativi alla prova con inversione di polarità eseguita sull'XLPE 845/01 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Dalle Fig. 4.55 (a) e (h) si osserva la formazione di eterocarica all'anodo e l'iniezione di portatori di carica negativa dal catodo, i quali si muovono verso l'elettrodo positivo provocando un aumento della densità di carica negativa vicino a quest'ultimo.

Dopo l'inversione di polarità si osserva un movimento di elettroni verso il nuovo anodo; ciò porta alla formazione di carica positiva nella maggior parte del provino (Fig. 4.55 (c)). Nel corso della prova si ha la formazione di eterocarica all'anodo e l'iniezione di portatori di carica negativa dal catodo, i quali si muovono verso l'elettrodo positivo provocando un aumento della densità di carica negativa vicino al quest'ultimo (Fig. 4.55 (e) e (h)).

4.4.2.2 Prova con inversione di polarità sul materiale 845/03

Nella Fig. 4.56 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale 845/03.

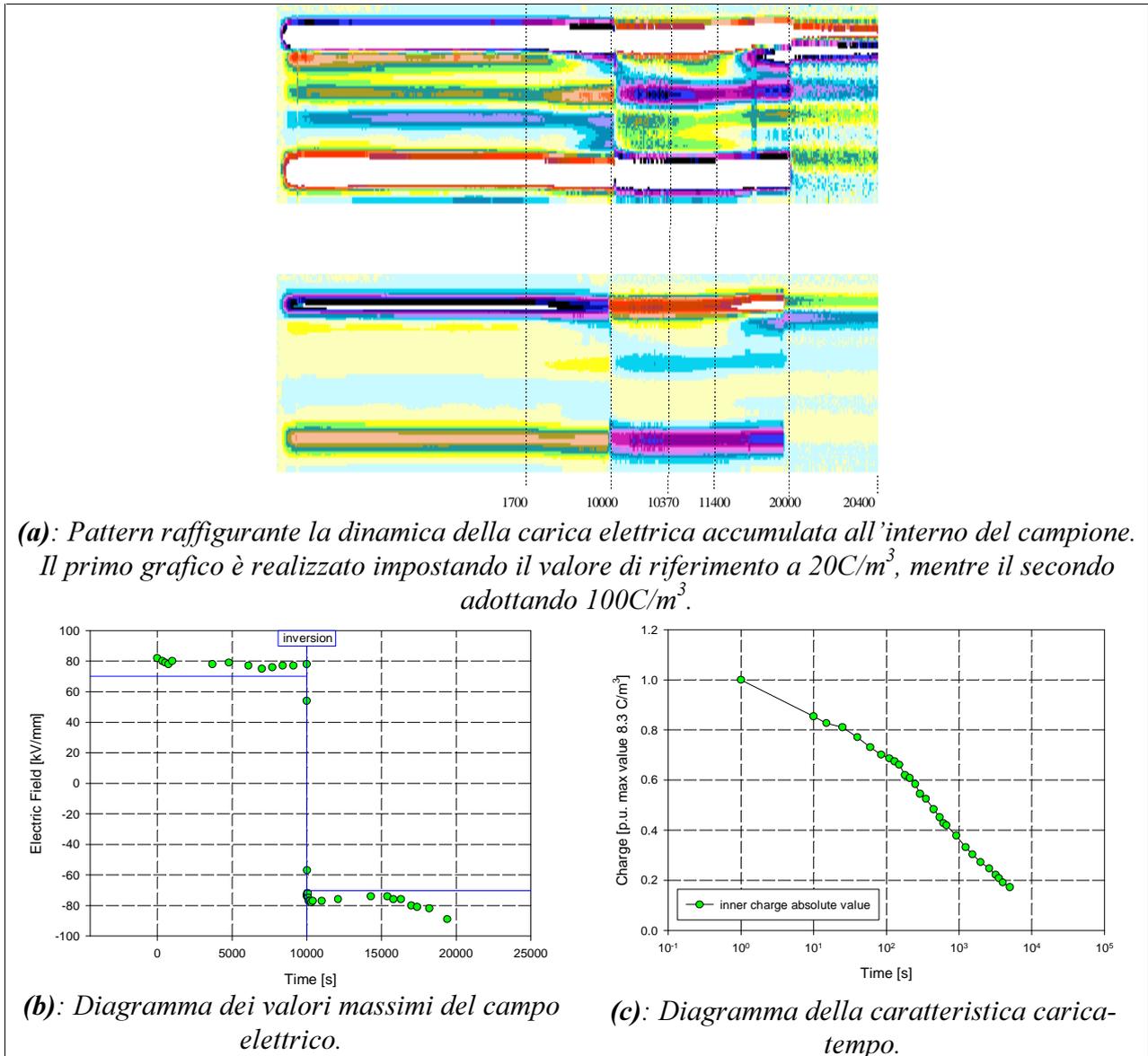


Figura 4.56

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale 845/03 a 20°C con campo elettrico applicato pari a $70\text{ kV}/\text{mm}$.

Inizialmente il materiale presenta eterocarica al catodo ed omocarica all'anodo. In seguito si osserva l'iniezione di elettroni dal catodo, che neutralizzano la carica positiva presente formando omocarica (Fig. 4.56 (a)). All'anodo si ha accumulo di eterocarica; la Fig. 4.56 (a) evidenzia il movimento di portatori di carica negativi dalla posizione centrale del provino all'interfaccia con l'elettrodo positivo.

Nei primi istanti che seguono l'inversione di polarità della tensione si osserva il movimento di elettroni verso il nuovo anodo (Fig. 4.56 (a)). Negli istanti successivi si ha una diminuzione di densità della carica positiva accumulata vicino all'anodo e la formazione di eterocarica (Fig. 4.56 (a)). Risulta visibile anche l'iniezione di elettroni dal catodo che, in un primo momento, neutralizzano la carica positiva e, successivamente, portano alla formazione di eterocarica vicino all'elettrodo positivo (Fig. 4.56 (a)).

4.4.2.3 Prova con inversione di polarità sul materiale P0

Nella Fig. 4.57 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità eseguita sul materiale P0.

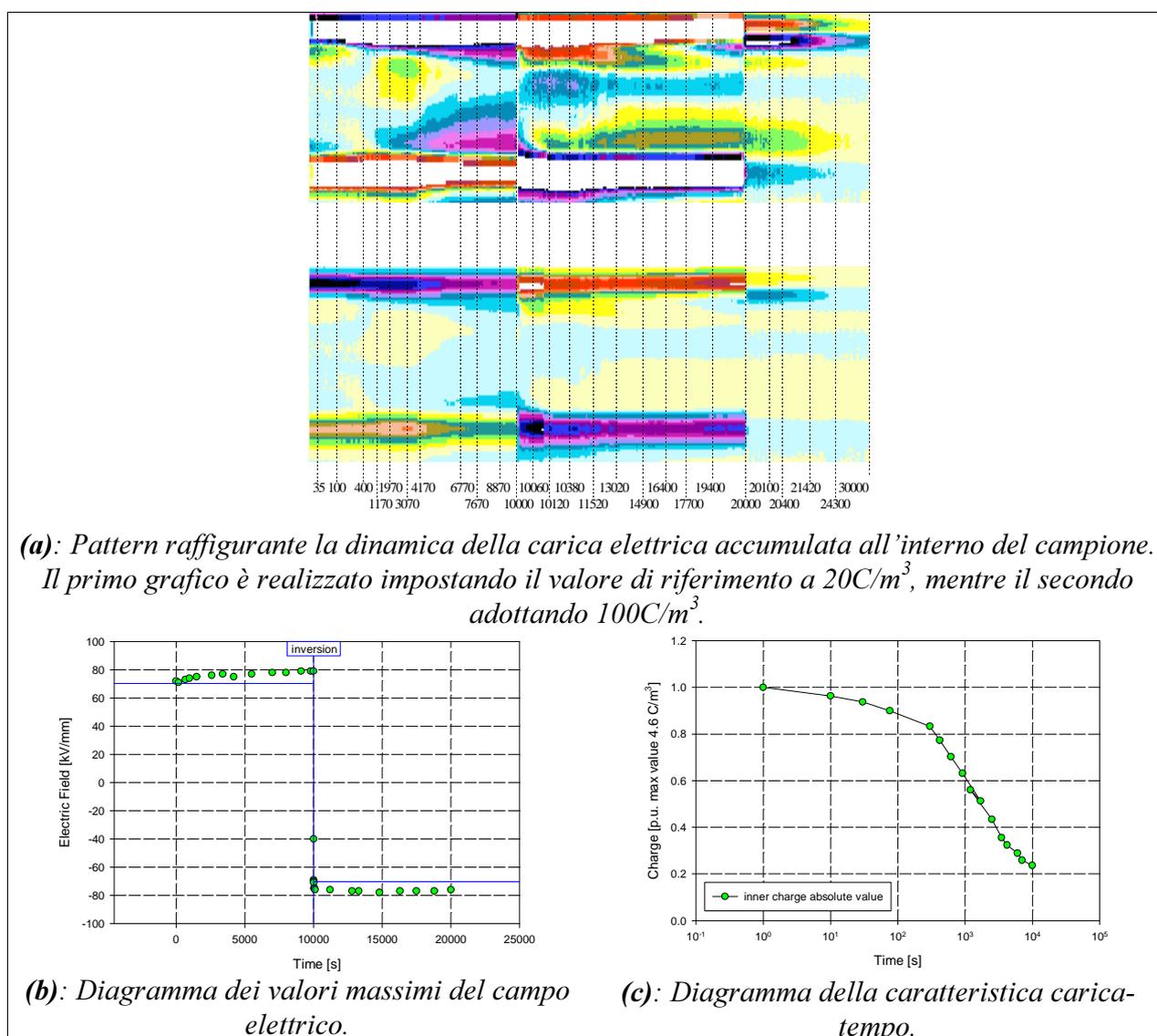


Figura 4.57

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P0 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Inizialmente il materiale presenta un leggero accumulo di eterocarica agli elettrodi. In seguito si osserva una iniezione di carica dall'elettrodo negativo che va a neutralizzare la carica positiva presente all'interfaccia, finendo poi col formare omocarica. All'elettrodo positivo si osserva un progressivo incremento della densità di eterocarica accumulata (Fig. 4.57 (a)).

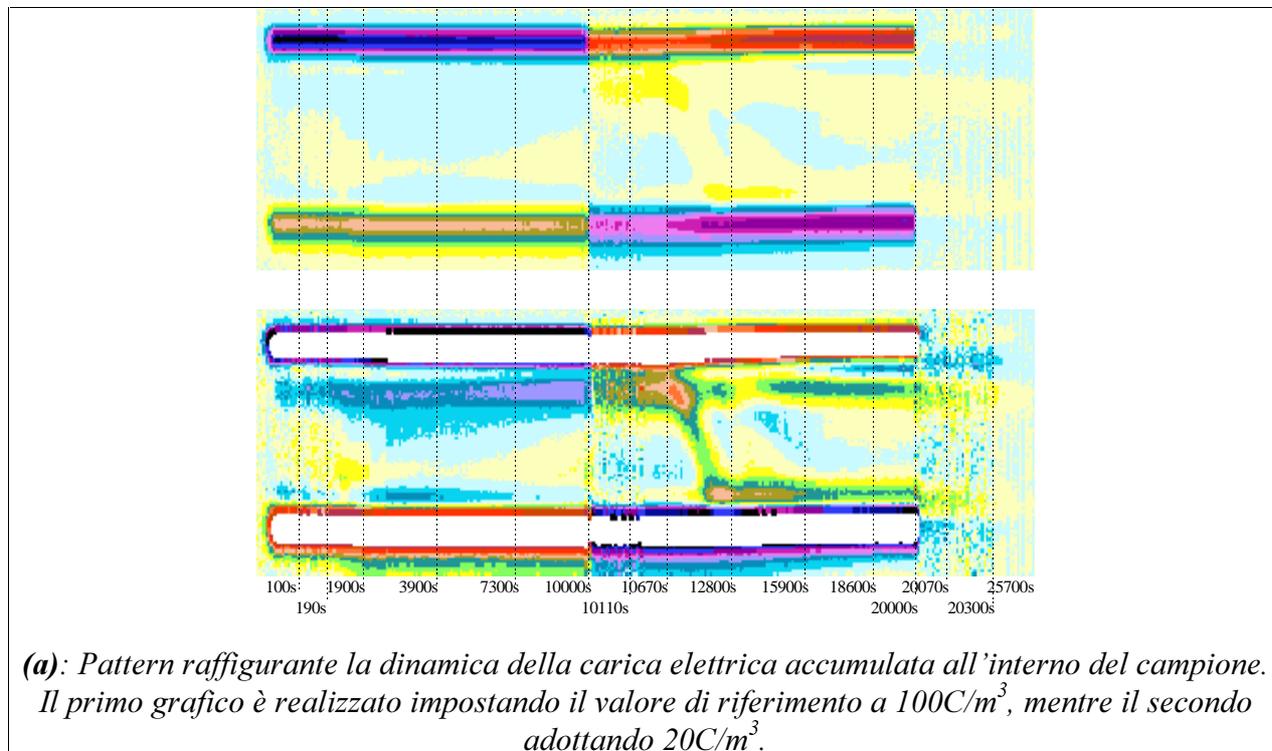
Dopo l'inversione di polarità si ha l'estrazione di elettroni da parte dell'elettrodo positivo (Fig. 4.57 (a)). Dalla figura si può anche osservare il movimento di portatori di carica negativi verso l'anodo, movimento che porta alla formazione di eterocarica al catodo ed a un leggero accumulo di carica negativa nella posizione centrale del provino.

In seguito, si ha una graduale diminuzione della densità di carica positiva all'anodo fino alla formazione di eterocarica (Fig. 4.57 (a)).

Le rilevazioni sperimentali mostrano l'effetto predominante dell'elettrodo di alluminio sui meccanismi di accumulo di carica spaziale.

4.4.2.4 Prova con inversione di polarità sul materiale P1

Nella Fig. 4.58 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità eseguita sul materiale P1.



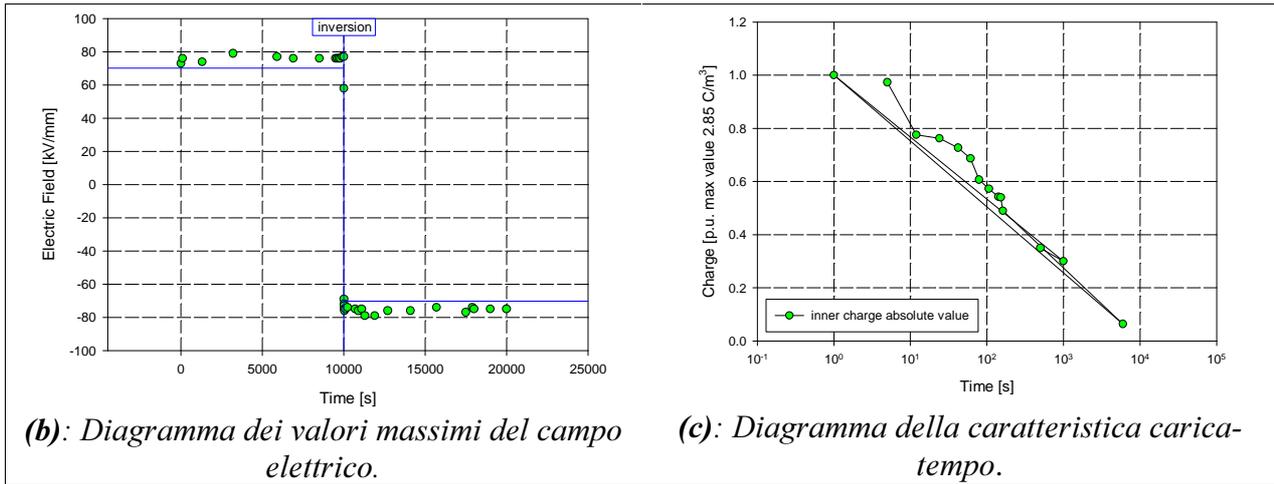


Figura 4.58

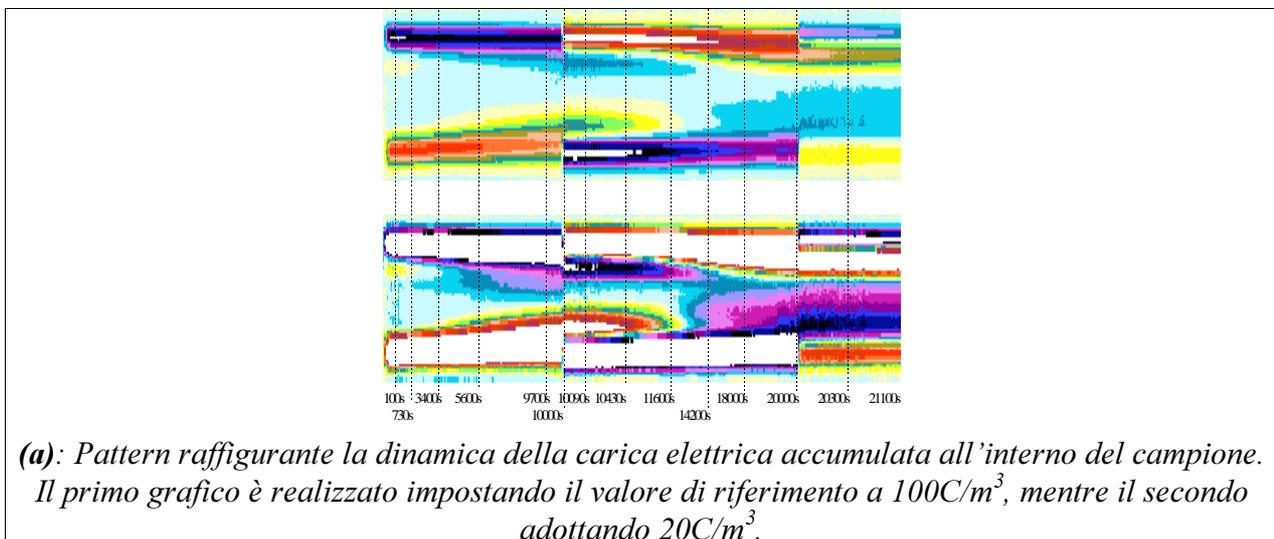
Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P1 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

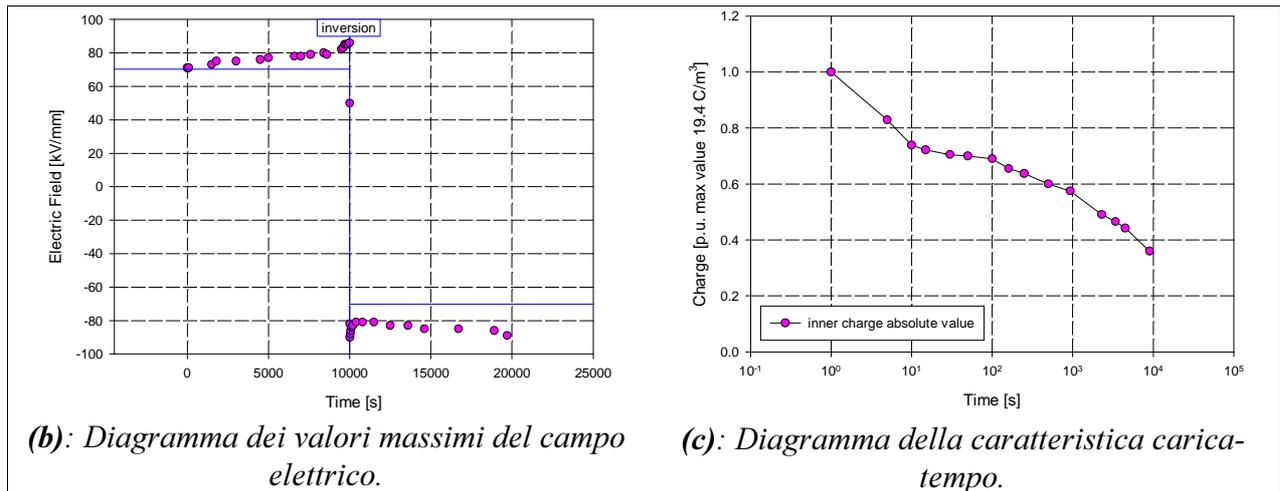
La Fig. 4.58 (a) mostra nel corso dei primi 10000s la formazione di omocarica all'elettrodo negativo. Nei primi istanti successivi all'inversione di polarità della tensione si ha, invece, omocarica dall'anodo.

Trascorsi 700s dall'inversione, una parte dei portatori di carica positivi presenti in prossimità dell'elettrodo di alluminio si muovono verso il catodo (*packet charge*), aumentando la densità di eterocarica presente all'elettrodo negativo e contemporaneamente diminuendo la densità di omocarica presente vicino all'elettrodo positivo (Fig. 4.58 (a)).

4.4.2.5 Prova con inversione di polarità sul materiale P2

Nella Fig. 4.59 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P2.



**Figura 4.59**

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P2 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

La Fig. 4.59 (a) mostra la formazione di carica positiva vicino all'anodo e di carica negativa vicino al catodo, con densità continuamente crescente durante i primi 10000s di osservazione. Tale accumulo di carica comporta un aumento del campo elettrico all'interno del provino (Fig. 4.59 (b)).

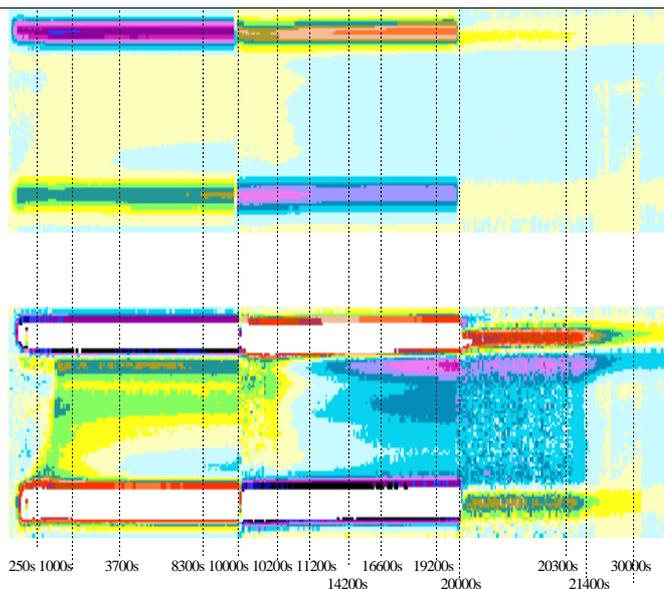
Durante l'inversione di polarità, nel materiale permane la carica accumulata in precedenza (Fig. 4.59 (a)); ciò porta alla presenza di eterocarica ad entrambi gli elettrodi. Tale carica accumulata indebolisce il campo elettrico all'interno del volume del materiale, mentre ne determina l'aumento agli elettrodi.

Dopo l'inversione di polarità riprende l'iniezione di omocarica dal catodo e l'estrazione di elettroni dall'anodo. Ciò provoca la neutralizzazione dell'eterocarica presente nelle vicinanze degli elettrodi. Trascorsi 15000 secondi si osserva, vicino ad entrambi gli elettrodi, l'accumulo di omocarica, la cui densità aumenta progressivamente fino alla *volt off* (Fig. 4.59 (a)).

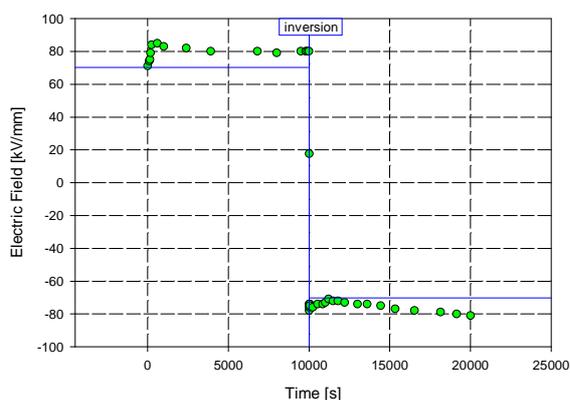
Le rilevazioni sperimentali effettuate evidenziano un effetto maggiore dell'elettrodo di semiconduttivo, rispetto a quello in alluminio, sul meccanismo di accumulo di carica all'interno del materiale.

4.4.2.6 Prova con inversione di polarità sul materiale P3

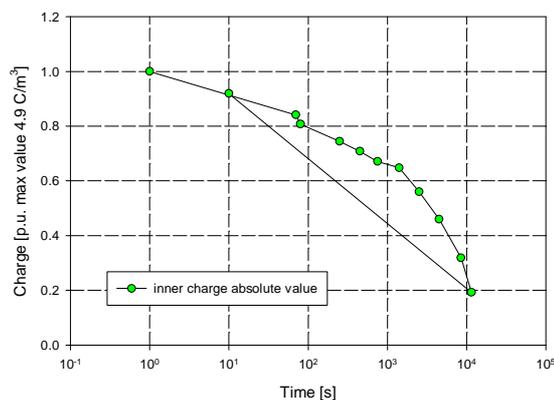
Nella Fig. 4.60 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P3.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $100\text{C}/\text{m}^3$, mentre il secondo adottando $20\text{C}/\text{m}^3$.



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico.



(c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.60

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P3 a 20°C con campo elettrico applicato pari a $70\text{ kV}/\text{mm}$.

Inizialmente il materiale presenta carica positiva sia vicino al catodo sia vicino all'anodo. In seguito (Fig. 4.60 (a)), si osserva lo spostamento della carica positiva presente all'anodo verso l'elettrodo negativo, con un conseguente incremento dell'eterocarica già presente.

Dopo l'inversione di polarità si osserva una iniezione di elettroni da parte dell'elettrodo negativo (Fig. 4.60 (a)). I portatori di carica negativa iniettati si muovono rapidamente verso l'anodo; ciò porta al graduale accumulo di elettroni vicino all'elettrodo positivo (Fig. 4.60 (a)).

I risultati sperimentali ottenuti evidenziano l'effetto dominante dell'elettrodo di semiconduttivo sul meccanismo di formazione della carica spaziale.

4.4.2.7 Prova con inversione di polarità sul materiale P4

Nella Fig. 4.61 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità eseguita sul materiale P4.

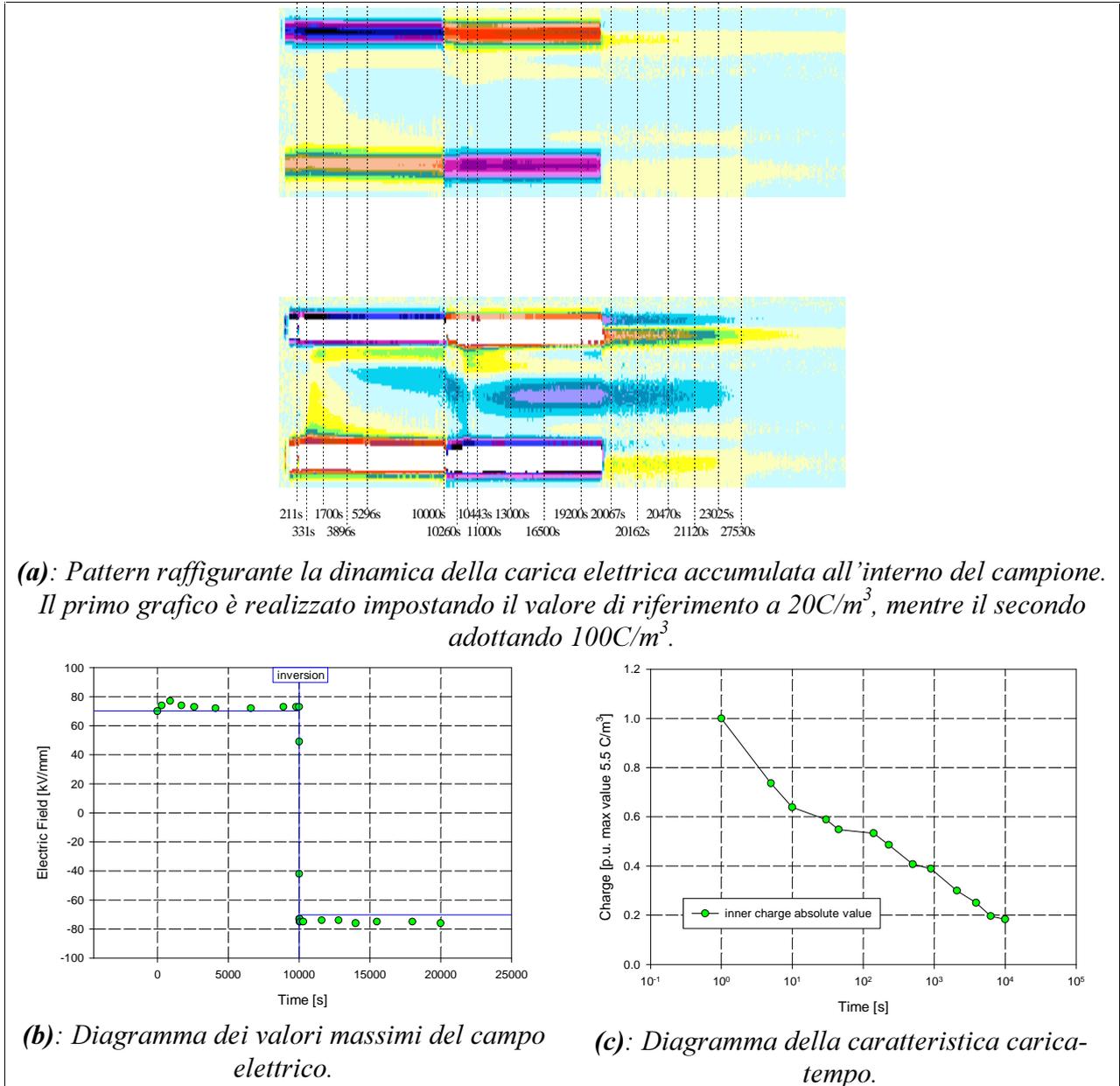


Figura 4.61

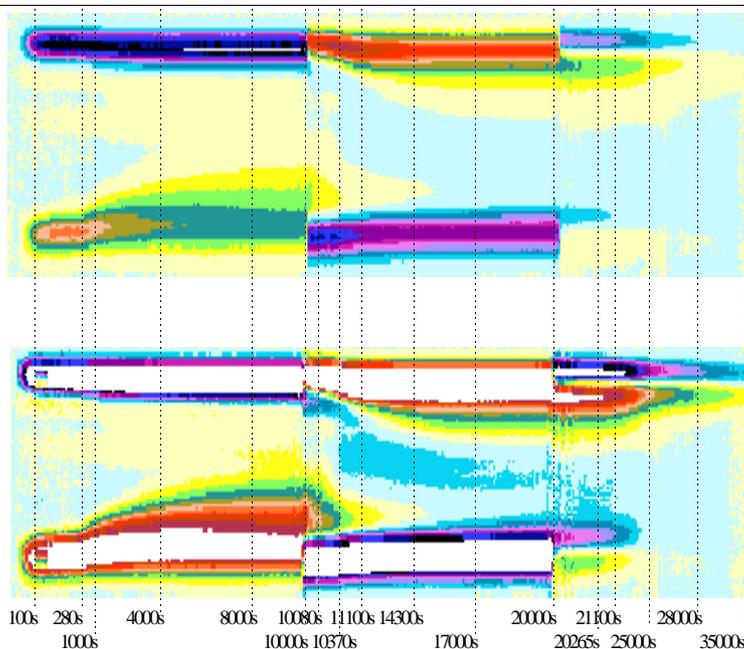
Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P4 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

La Fig. 4.61 (a) evidenzia la formazione di omocarica all'anodo. Contemporaneamente si osserva la formazione di eterocarica al catodo.

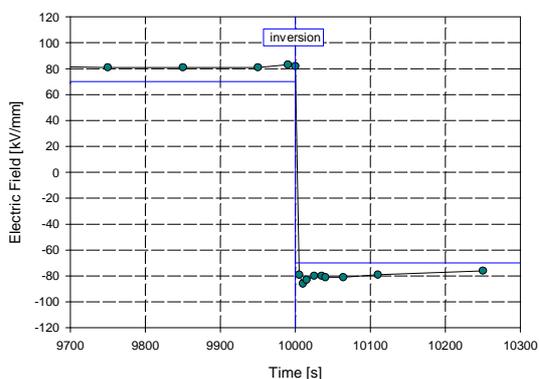
Dopo l'inversione di polarità si ha, inizialmente, formazione di omocarica al catodo e all'anodo. In seguito si riscontra un movimento di portatori di carica negativi verso l'anodo e il conseguente accumulo di eterocarica vicino ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.61 (a)).

4.4.2.8 Prova con inversione di polarità sul materiale P5

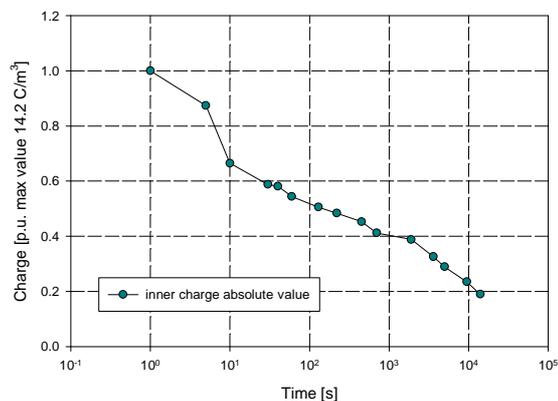
Nella Fig. 4.62 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P5.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $100\text{C}/\text{m}^3$, mentre il secondo adottando $20\text{C}/\text{m}^3$.



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico.



(c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.62

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P5 a 20°C con campo elettrico applicato pari a $70\text{ kV}/\text{mm}$.

La Fig. 4.62 (a) mostra la formazione di omocarica all'anodo. La carica spaziale positiva si muove progressivamente verso il catodo richiamando in quest'ultimo carica negativa. Si ha

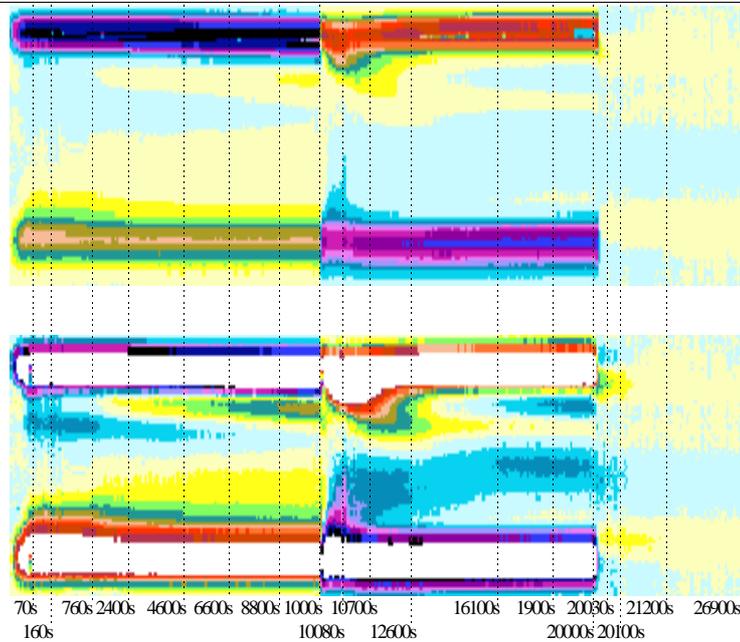
quindi una diminuzione del campo elettrico all'interfaccia con l'elettrodo positivo e un incremento al catodo.

Nei primi secondi che seguono l'inversione di polarità della tensione si ha eterocarica ad entrambi gli elettrodi, negli istanti successivi si ha invece la riformazione di omocarica ad entrambi elettrodi (Fig. 4.62 (a)).

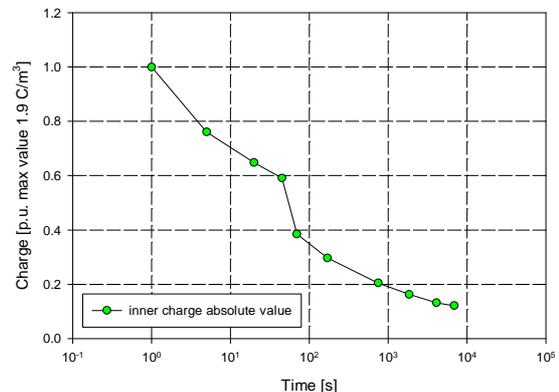
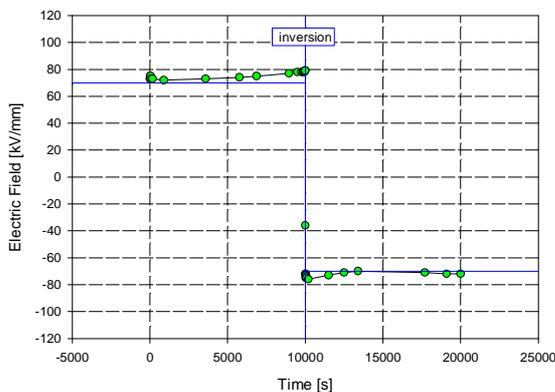
Dalle rilevazioni sperimentali effettuate si evince che l'elettrodo maggiormente attivo è quello di semiconduttivo.

4.4.2.9 Prova con inversione di polarità sul materiale P6

Nella Fig. 4.63 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P6.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $100\text{C}/\text{m}^3$, mentre il secondo adottando $20\text{C}/\text{m}^3$.



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico. (c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.63

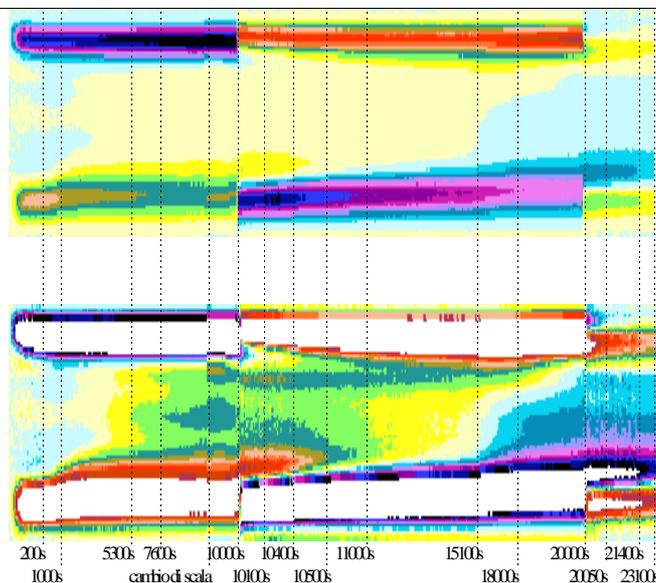
Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P6 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

Inizialmente il materiale presenta omocarica vicino ad entrambi gli elettrodi. In seguito si osserva la formazione di eterocarica al catodo e la carica positiva, probabilmente in seguito all'estrazione di elettroni dall'elettrodo positivo, va a neutralizzare progressivamente la carica negativa presente nella zona centrale del provino (Fig. 4.63 (a)).

Nei primi secondi dopo l'inversione di polarità della tensione si ha formazione di omocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.63 (a)). I portatori di carica positiva si muovono verso l'elettrodo negativo, mentre gli elettroni iniettati dal catodo si muovono verso l'elettrodo positivo. Questo flusso di portatori di carica porta alla progressiva formazione di eterocarica vicino ad entrambi gli elettrodi ed il conseguente incremento del corrispondente campo elettrico (Fig. 4.63 (a)).

4.4.2.10 Prova con inversione di polarità sul materiale P7

Nella Fig. 4.64 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P7.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $100C/m^3$, mentre il secondo adottando $20C/m^3$.

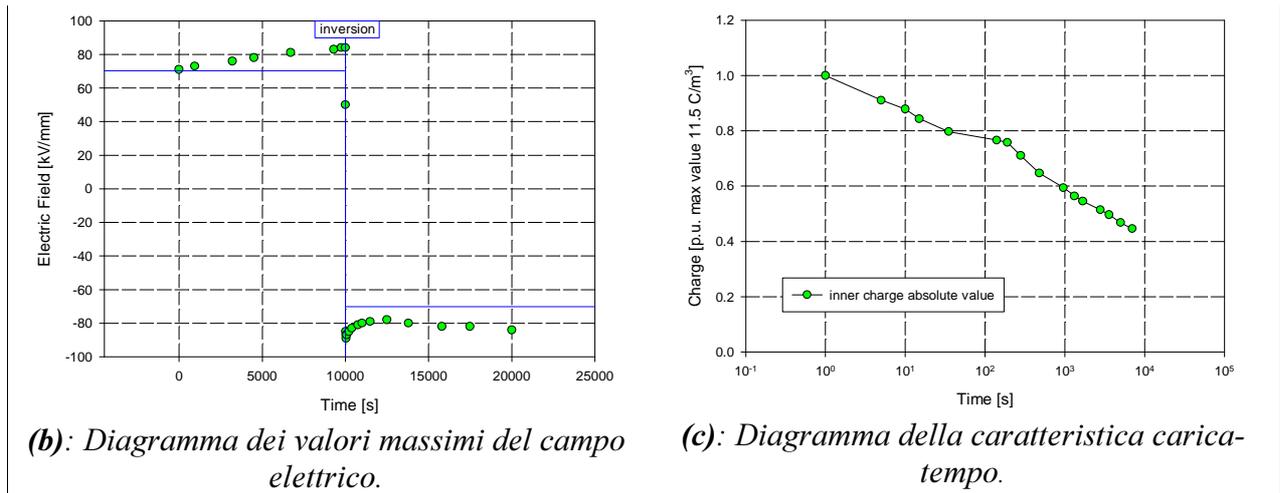


Figura 4.64

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P7 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

Il materiale presenta una forte formazione di carica spaziale positiva, probabilmente dovuta alla deiezione di elettroni all'anodo. Ciò comporta il richiamo di carica negativa al catodo (Fig. 4.64 (a)).

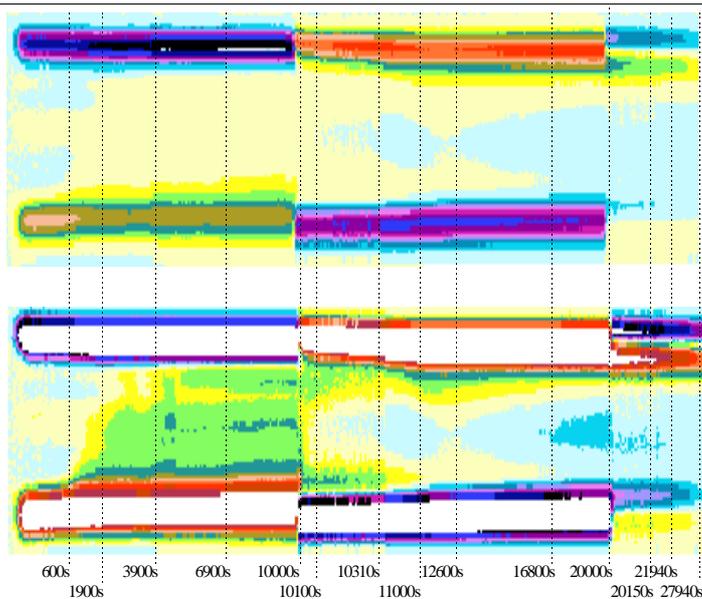
Nei primi istanti dopo l'inversione di polarità, a causa della carica accumulata in precedenza, si ha eterocarica al catodo ed omocarica all'anodo, ma dopo circa 10s si ha nuovamente formazione di eterocarica.

La Fig. 4.64 (a) mostra il movimento dei portatori di carica negativi dal catodo verso l'anodo. Questo movimento porta a neutralizzare la carica positiva accumulata nella parte centrale del campione. La diminuzione della densità di carica positiva nelle vicinanze dell'elettrodo di alluminio richiama, sullo stesso, carica positiva.

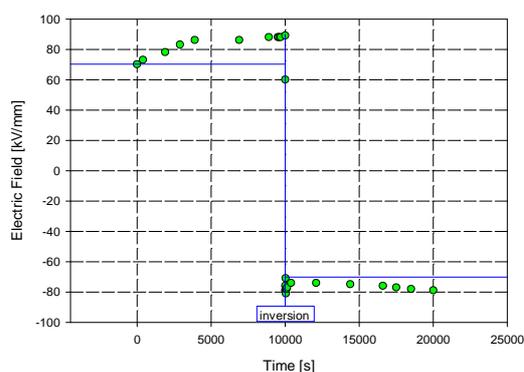
I risultati sperimentali ottenuti mostrano che l'elettrodo di semiconduttivo risulta essere il più attivo nel meccanismo di accumulo di carica spaziale, sia prima sia dopo l'inversione di polarità della tensione.

4.4.2.11 Prova con inversione di polarità sul materiale P8

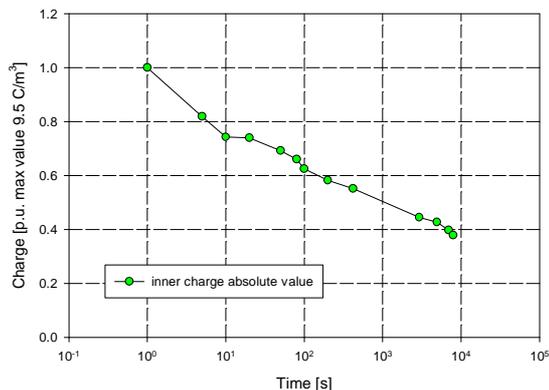
Nella Fig. 4.65 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P8.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 100C/m^3 , mentre il secondo adottando 20C/m^3 .



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico.



(c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.65

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P8 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Il materiale presenta una forte formazione di carica positiva. In seguito i portatori di carica positiva si muovono all'interno del materiale formando eterocarica al catodo (Fig. 4.65 (a)).

Ciò provoca una forte deformazione del campo con una notevole amplificazione rispetto a quello laplaciano (Fig. 4.65 (b)).

Nei primi istanti dopo l'inversione di polarità si ha eterocarica al catodo ed omocarica all'anodo (dovuta alla carica accumulata in precedenza). In questo caso però, dopo pochi secondi, al catodo si ha formazione di omocarica.

La Fig. 4.65 (a) mostra il movimento dei portatori di carica negativi, iniettati dal catodo, verso l'anodo. Questo movimento porta a neutralizzare la carica positiva accumulata nella parte centrale del campione.

I risultati sperimentali ottenuti mostrano che l'elettrodo di semiconduttivo risulta maggiormente attivo nel fenomeno di accumulo di carica spaziale, sia prima sia dopo l'inversione di polarità della tensione.

4.4.2.12 Prova con inversione di polarità sul materiale P9

Nella Fig. 4.66 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P9.

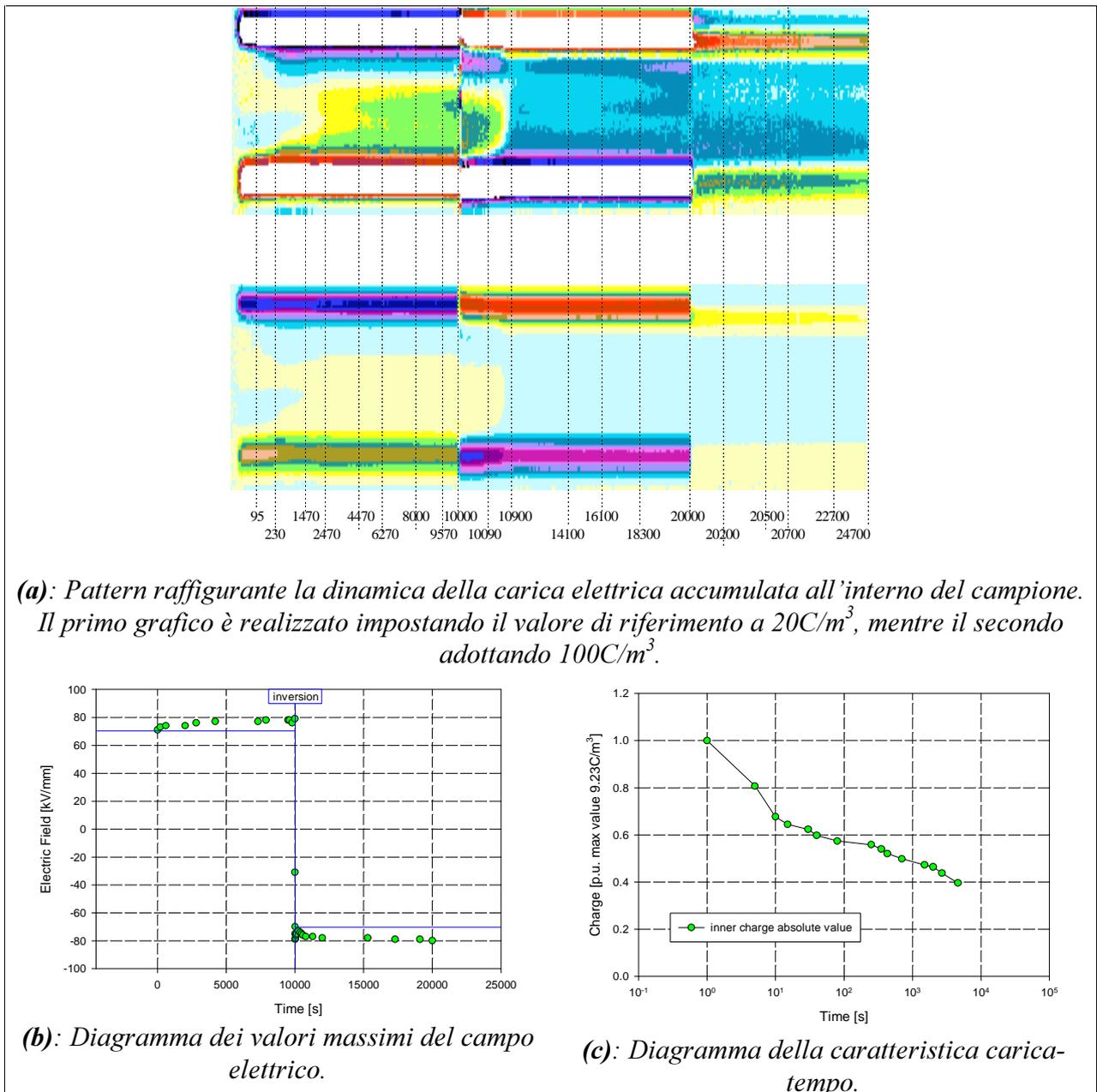


Figura 4.66

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P9 a $20^\circ C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

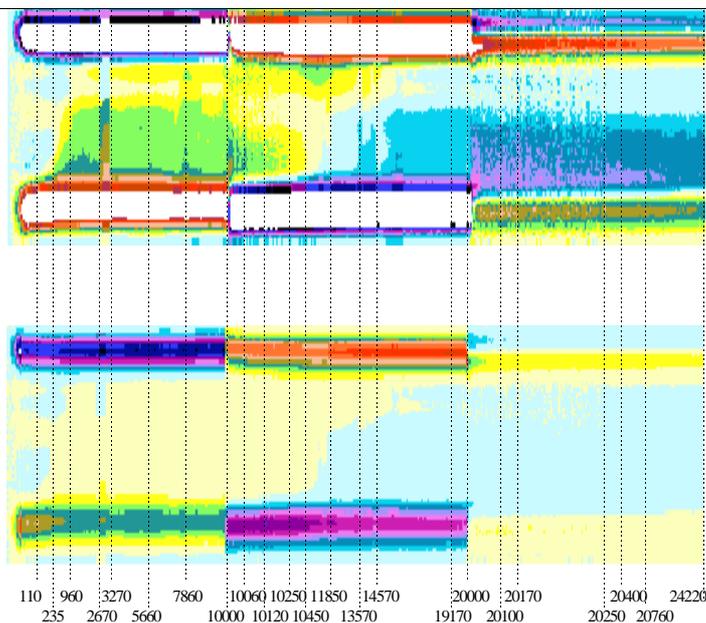
Il materiale presenta inizialmente formazione di omocarica sia al catodo sia all'anodo. In seguito i portatori di carica positiva si muovono all'interno del materiale formando un notevole accumulo di carica positiva nella zona centrale del provino (Fig. 4.66 (a)).

Nei primi istanti dopo l'inversione di polarità si ha eterocarica ad entrambi gli elettrodi (dovuta alla carica accumulata in precedenza). Trascorsi pochi secondi l'accumulo di carica negativa prevale su quello di carica positiva. La Fig. 4.66 (a) mostra il movimento dei portatori di carica negativi, iniettati dal catodo, verso l'anodo. Questo movimento porta all'accumulo di carica negativa praticamente in tutto il campione.

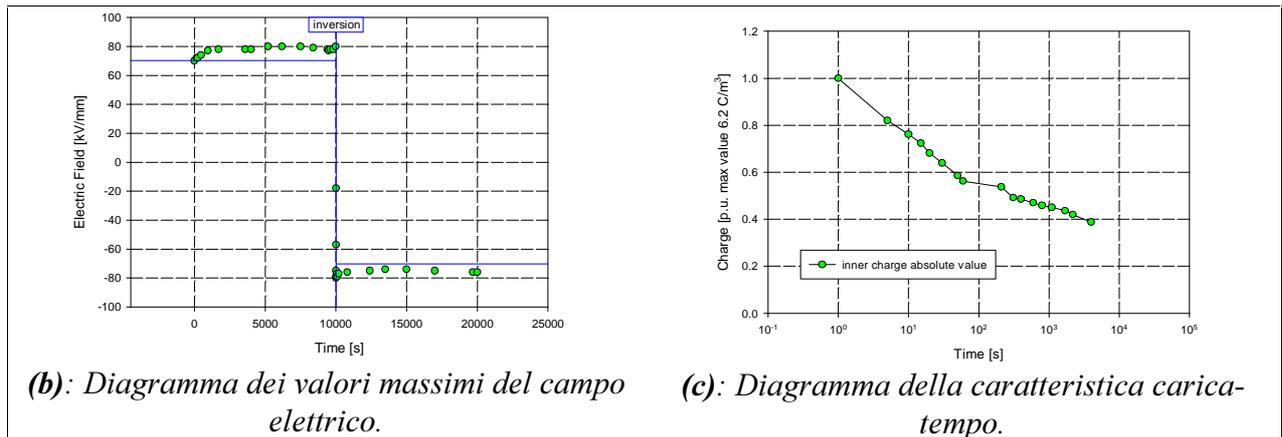
I risultati sperimentali ottenuti mostrano ancora che l'elettrodo di semiconduttivo domina il meccanismo di accumulo di carica spaziale sia prima sia dopo l'inversione di polarità della tensione.

4.4.2.13 Prova con inversione di polarità sul materiale P10

Nella Fig. 4.67 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P10.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 20 C/m^3 , mentre il secondo adottando 100 C/m^3 .

**Figura 4.67**

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P10 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

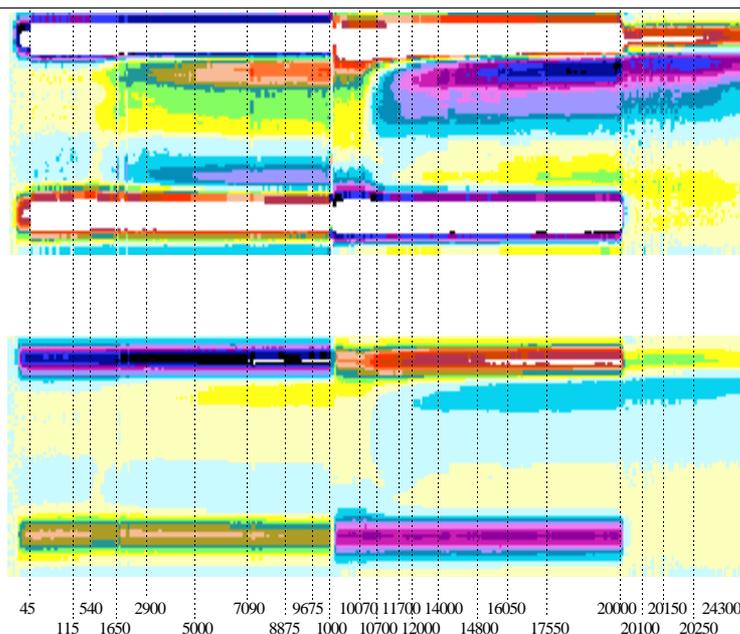
In questo caso, nella prima parte della prova, si ha fin da subito una sostanziale prevalenza di carica positiva. Ciò porta ad un progressivo aumento dell'eterocarica vicino al catodo (Fig. 4.67 (a)).

Durante i primi secondi dopo l'inversione di polarità si ha eterocarica al catodo ed omocarica all'anodo (Fig. 4.67 (a)). In seguito si osserva una iniezione di portatori di carica negativi da parte del catodo; ciò porta alla neutralizzazione della carica positiva accumulata vicino all'elettrodo di alluminio ed al contemporaneo accumulo di eterocarica all'anodo (Fig. 4.67 (a)).

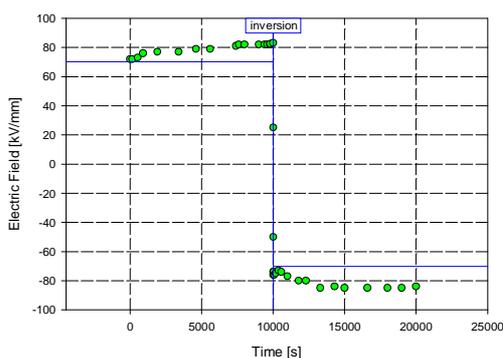
Dalle rilevazioni sperimentali effettuate, risulta sempre evidente l'effetto dominante dell'elettrodo di semiconduttivo sul meccanismo di formazione della carica.

4.4.2.14 Prova con inversione di polarità sul materiale P11

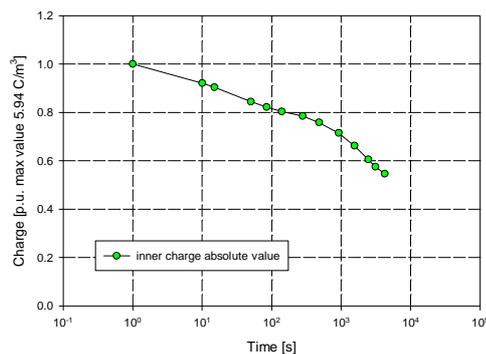
Nella Fig. 4.68 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P11.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 20C/m^3 , mentre il secondo adottando 100C/m^3 .



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico.



(c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.68

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P11 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Il materiale esaminato presenta accumulo di eterocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.68 (a)); la densità di carica positiva accumulata vicino al catodo è maggiore, in valore assoluto, di quella rilevata vicino all'anodo.

Nei primi istanti che seguono l'inversione di polarità si ha omocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.68 (a)), dovuta alla carica accumulata precedentemente. In seguito ritorna a formarsi eterocarica (Fig. 4.68 (a)); la densità di carica negativa accumulata vicino all'anodo è maggiore, in valore assoluto, di quella rilevata vicino al catodo.

Sebbene il comportamento durante l'inversione sia favorevole (la Fig. 4.68 (b) mostra che l'andamento della distribuzione di carica in questo materiale non provoca forti deformazioni di campo elettrico), la formazione di una forte eterocarica agli elettrodi comporta nel corso della prova l'incremento del campo elettrico alle interfacce del materiale con gli elettrodi.

4.4.2.15 Prova con inversione di polarità sul materiale P12

Nella Fig. 4.69 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P12.

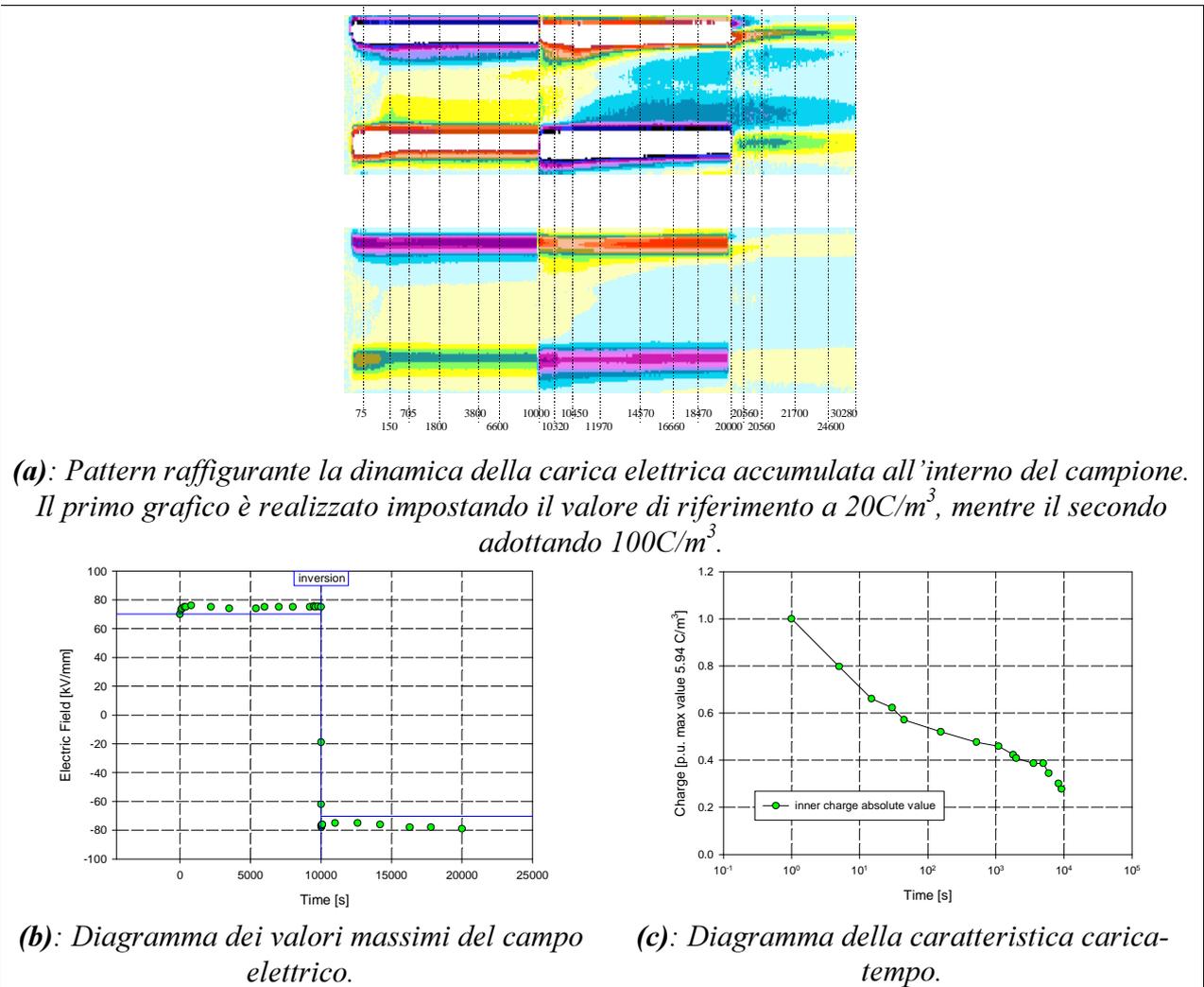


Figura 4.69

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P12 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Il materiale presenta inizialmente formazione di omocarica ad entrambi gli elettrodi. In seguito le lacune liberate nelle vicinanze dell'anodo si muovono all'interno del materiale creando una distribuzione più diffusa di carica positiva (Fig. 4.69 (a)).

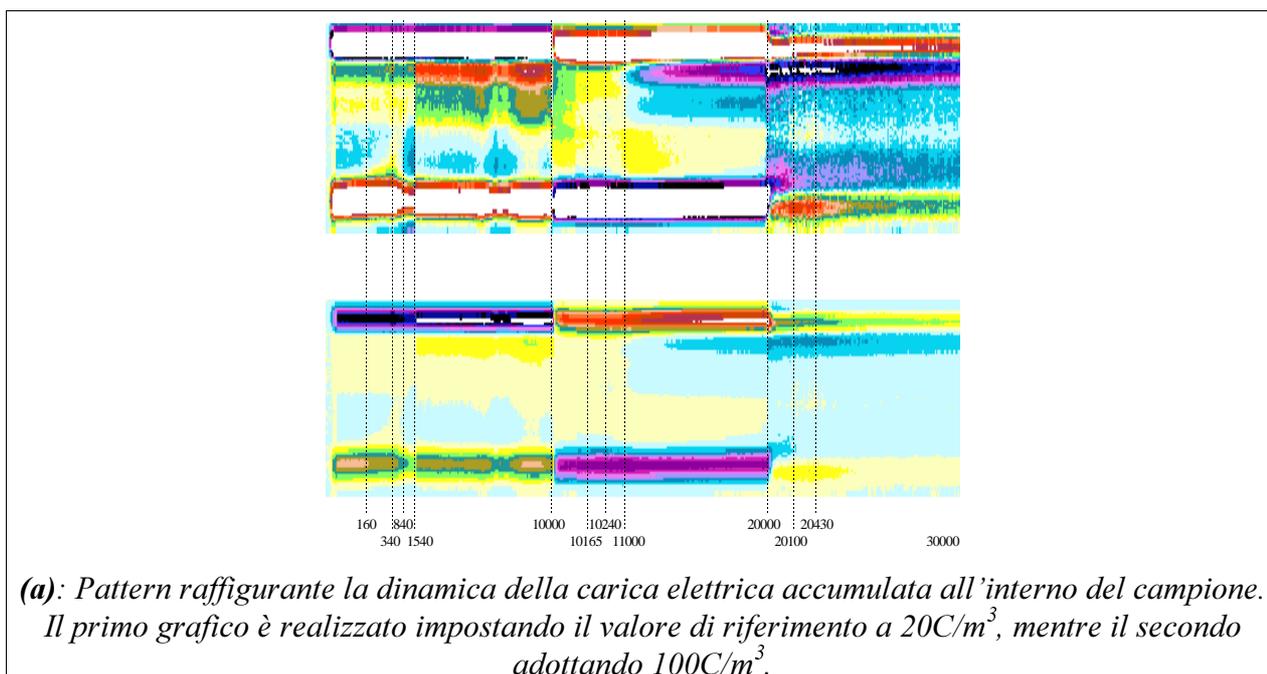
Nei primi istanti dopo l'inversione di polarità si ha eterocarica al catodo mentre all'anodo si forma omocarica. Dopo pochi secondi è il catodo a iniettare omocarica fino ad originare una distribuzione diffusa di carica negativa.

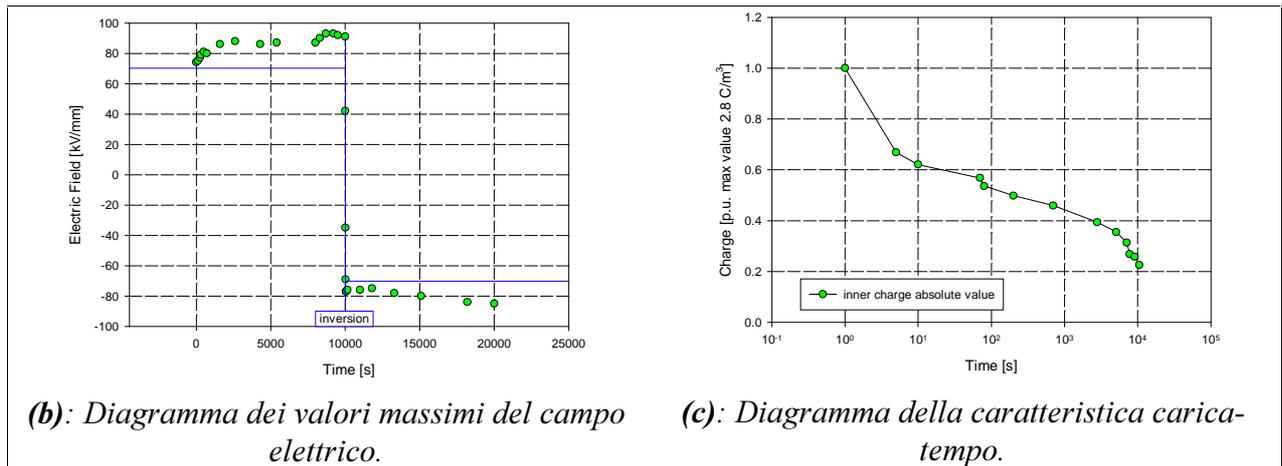
La Fig. 4.69 (a) evidenzia il movimento dei portatori di carica negativi, iniettati dal catodo, verso l'anodo. Questo movimento porta all'accumulo di carica negativa vicino all'elettrodo negativo e alla neutralizzazione di parte della carica positiva accumulata in precedenza vicino all'elettrodo positivo.

I risultati sperimentali ottenuti mostrano che l'elettrodo di semiconduttivo domina il meccanismo di accumulo di carica spaziale sia prima che dopo l'inversione di polarità della tensione.

4.4.2.16 Prova con inversione di polarità sul materiale P13

Nella Fig. 4.70 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P13.



**Figura 4.70**

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P13 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

Prima dell'inversione il materiale presenta una forte eterocarica al catodo; in Fig. 4.70(a) si nota il progressivo incremento dell'eterocarica accumulata al catodo. L'anodo invece risulta poco interessato da fenomeno di accumulo.

Nei primi istanti dopo l'inversione di polarità della tensione, la carica precedentemente accumulata origina una distribuzione di carica positiva che tende però a diminuire nel tempo. Dopo circa 1000s comincia a formarsi eterocarica vicino all'anodo (Fig. 4.70 (a)).

In seguito si ha un progressivo aumento della densità di eterocarica all'anodo che provoca una notevole deformazione della distribuzione di campo elettrico (Fig. 4.70 (b)).

La discontinuità riscontrata in alcuni tratti del *pattern* è dovuta all'*offset* presente in alcuni dei *file* acquisiti.

4.4.2.17 Prova con inversione di polarità sul materiale P14

Nella Fig. 4.71 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P14.

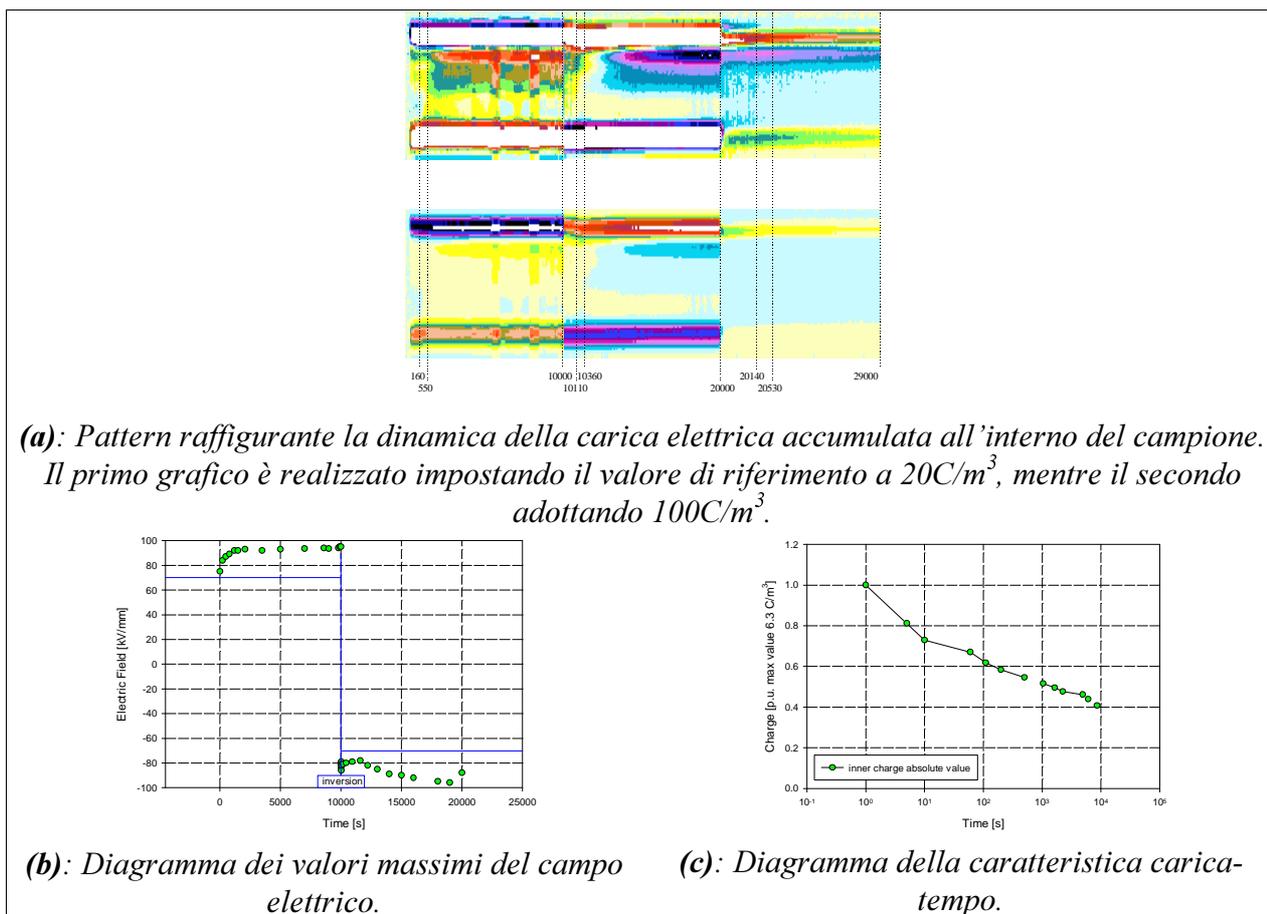


Figura 4.71

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P14 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Nella Fig. 4.71 (a) si osserva, durante i primi 10000s della prova, il progressivo incremento dell'eterocarica accumulata al catodo ed una quasi nulla attività dell'anodo.

Nei primi istanti dopo l'inversione di polarità, i portatori di carica negativa si muovono verso l'anodo; in Fig. 4.71 (a) è evidente la neutralizzazione di parte della carica positiva presente vicino all'elettrodo di alluminio.

In seguito si osserva un progressivo aumento della densità di eterocarica all'anodo e la conseguente deformazione della distribuzione di campo elettrico, come mostrato dalla Fig. 4.71 (b).

La discontinuità riscontrata in alcuni tratti del *pattern* è dovuta all'*offset* presente in alcuni dei *file* acquisiti.

4.4.2 18 Prova con inversione di polarità sul materiale P15

Nella Fig. 4.72 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P15.

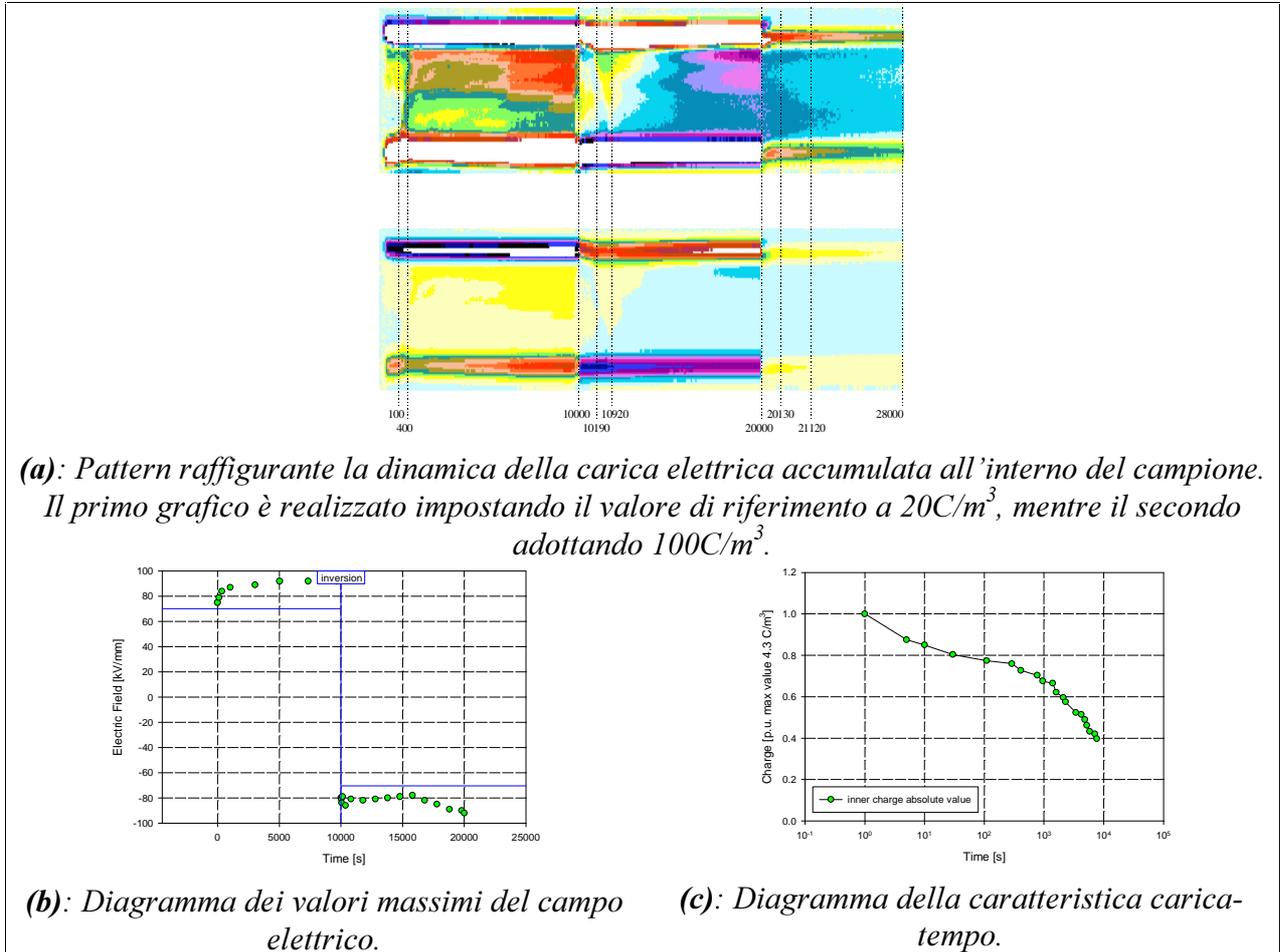


Figura 4.72

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P15 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

All'inizio della prova è presente eterocarica vicino al catodo; in seguito l'anodo estrae elettroni e le lacune liberate si muovono verso l'elettrodo negativo. Ciò porta ad un progressivo aumento della carica positiva vicino al catodo ed ad una diminuzione della densità di lacune vicino all'anodo (Fig. 4.72 (a)).

Durante l'inversione di polarità i portatori di carica negativi si muovono verso l'elettrodo in alluminio neutralizzando la carica positiva precedentemente accumulata (Fig. 4.72 (a)).

Nel corso della prova prosegue l'iniezione di portatori di carica negativi da parte del catodo con il contemporaneo accumulo di eterocarica all'anodo (Fig. 4.72 (a)).

4.4.2.19 Prova con inversione di polarità sul materiale P16

Nella Fig. 4.73 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P16.

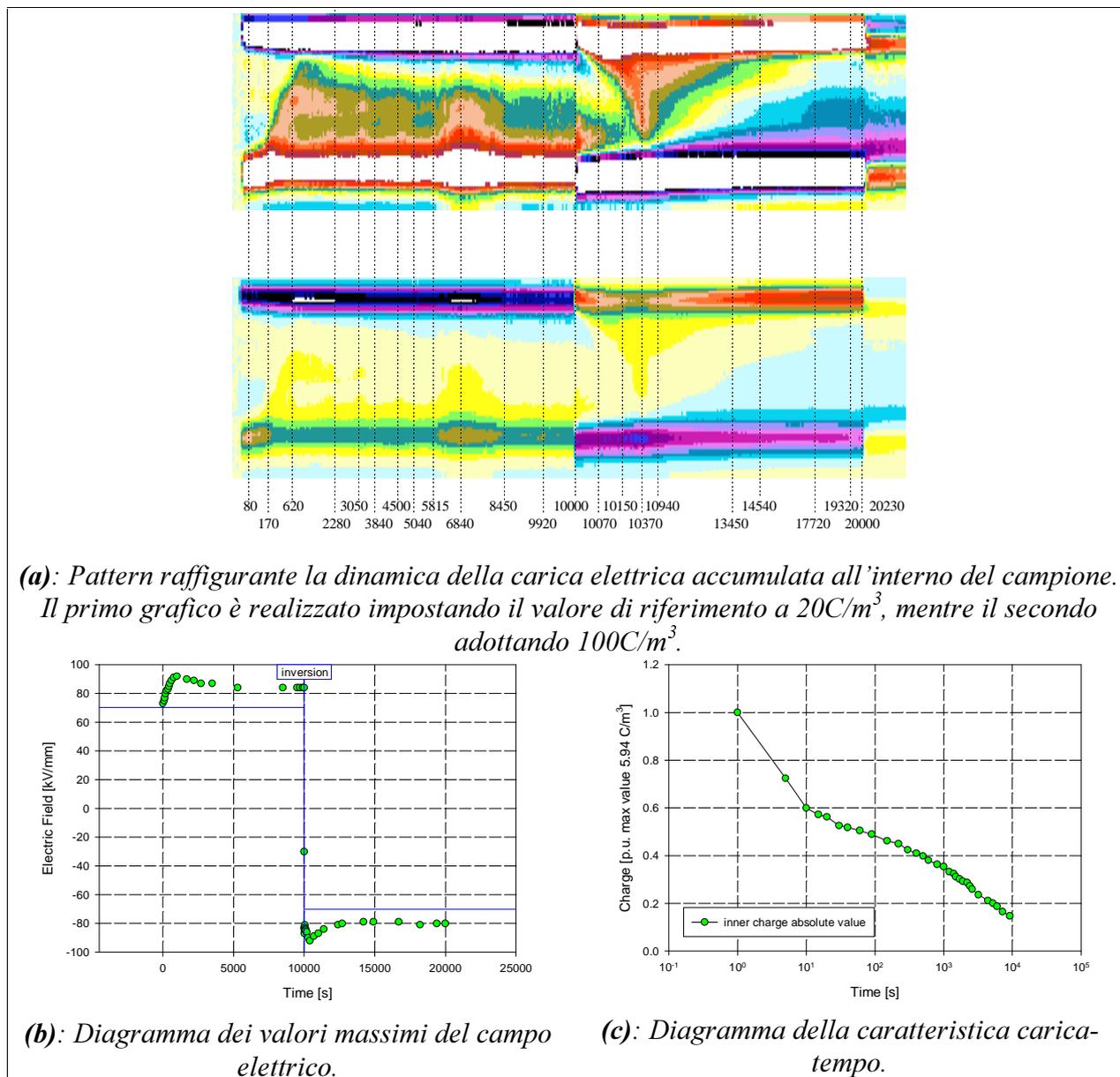


Figura 4.73

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P16 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Inizialmente il meccanismo di formazione della carica spaziale è controllato dalla deiezione di elettroni dall'elettrodo positivo, le lacune liberate si muovono verso il catodo richiamando così carica negativa (Fig. 4.73 (a)). Dopo circa 1000s il campo all'interfaccia con l'elettrodo in alluminio raggiunge un valore sufficiente all'attivazione del meccanismo elettrodo di iniezione di omocarica (Fig. 4.73 (a)).

Durante l'inversione il catodo inietta omocarica e l'anodo estrae elettroni (Fig. 4.73 (a)).

L'iniezione di portatori negativi dall'elettrodo in semiconduttivo risulta maggiore rispetto alla deiezione di elettroni da parte dell'elettrodo in alluminio (Fig. 4.73 (a)); ciò porta alla graduale neutralizzazione della carica positiva presente nel provino ed il conseguente aumento di lacune sull'anodo.

4.4.2.20 Prova con inversione di polarità sul materiale P17

Nella Fig. 4.74 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P17.

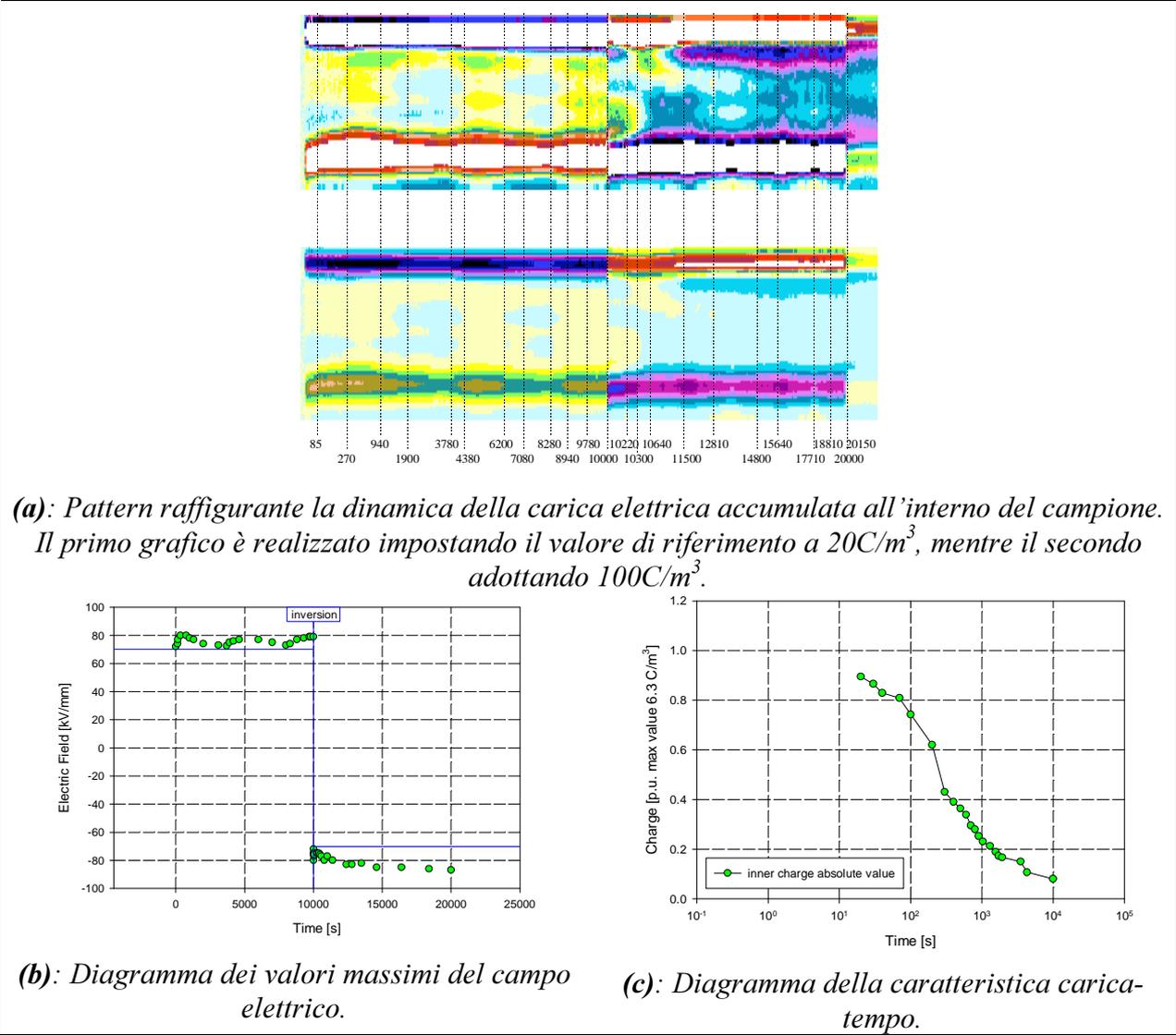


Figura 4.74

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P17 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Il materiale in esame presenta una debole formazione di omocarica all'anodo durante i primi 10000s di prova (Fig. 4.74 (a)), ma l'attività è estremamente limitata.

Durante l'inversione di polarità della tensione si osserva la presenza di eterocarica su entrambi gli elettrodi (carica legata alla distribuzione preinversione Fig. 4.74 (a)).

Nel seguito della prova il catodo inietta omocarica nel campione e i portatori di carica negativa si muovono verso l'anodo aumentando progressivamente la densità di eterocarica all'elettrodo positivo (Fig. 4.74 (a)).

Dai risultati ottenuti si evince che il meccanismo di formazione della carica all'interno del materiale è controllato dall'elettrodo in semiconduttivo.

4.4.2.21 Prova con inversione di polarità sul materiale P18

Nella Fig. 4.75 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P18.

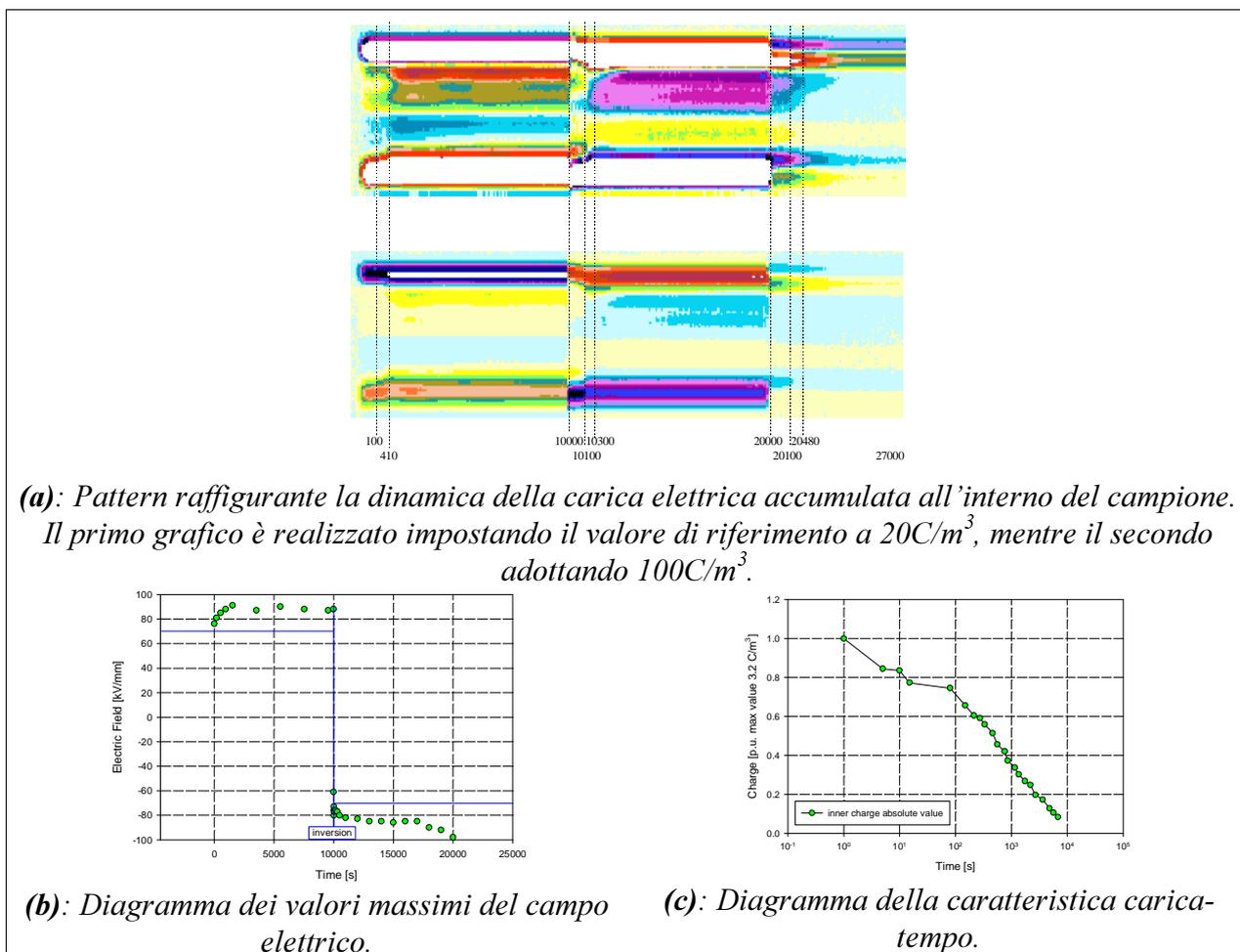


Figura 4.75

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P18 a $20^\circ C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Al tempo zero il materiale presenta eterocarica al catodo, che progressivamente cresce durante la prova, mentre all'anodo si ha la formazione di una leggera omocarica (Fig. 4.75 (a)).

A seguito dell'inversione di polarità, dopo una prima fase influenzata dalla distribuzione precedente, si ha formazione di eterocarica all'anodo e di una leggera omocarica al catodo (Fig. 4.75 (a)).

4.4.2.2 Prova con inversione di polarità sul materiale P19

Nella Fig. 4.76 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P19.

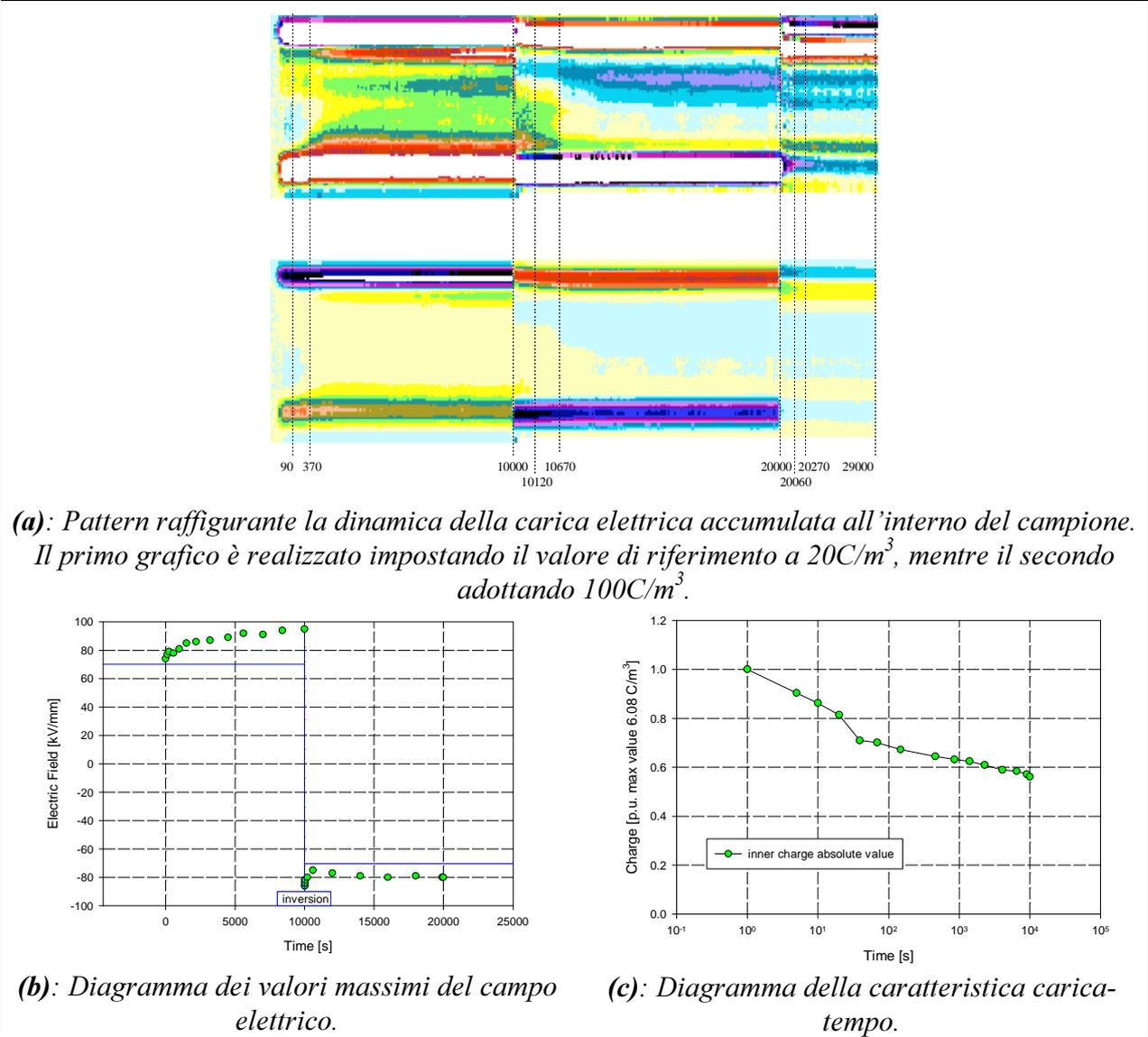


Figura 4.76

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P19 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

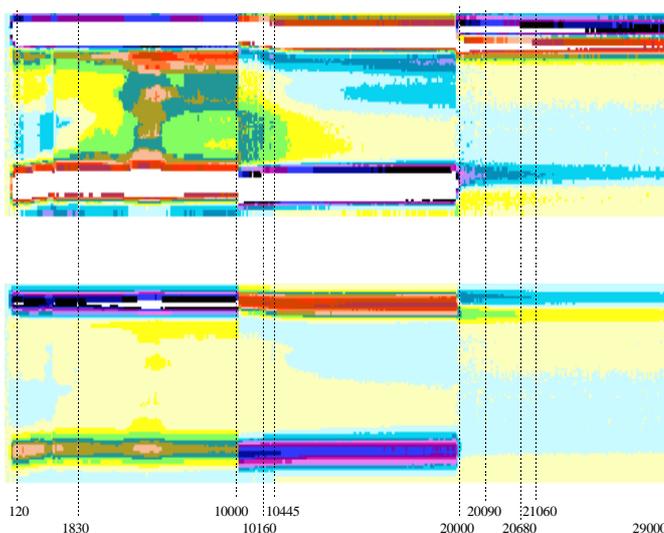
Prima dell'inversione si ha una forte distribuzione di carica positiva, che provoca eterocarica al catodo. Le lacune liberate si distribuiscono progressivamente all'interno del campione incrementando l'eterocarica vicino all'elettrodo negativo (Fig. 4.76 (a)).

Durante l'inversione di polarità il nuovo anodo richiama portatori di carica negativa, che vanno a neutralizzare parte della carica positiva accumulata, durante i primi 10000s della prova, vicino all'elettrodo di alluminio (Fig. 4.76 (a)).

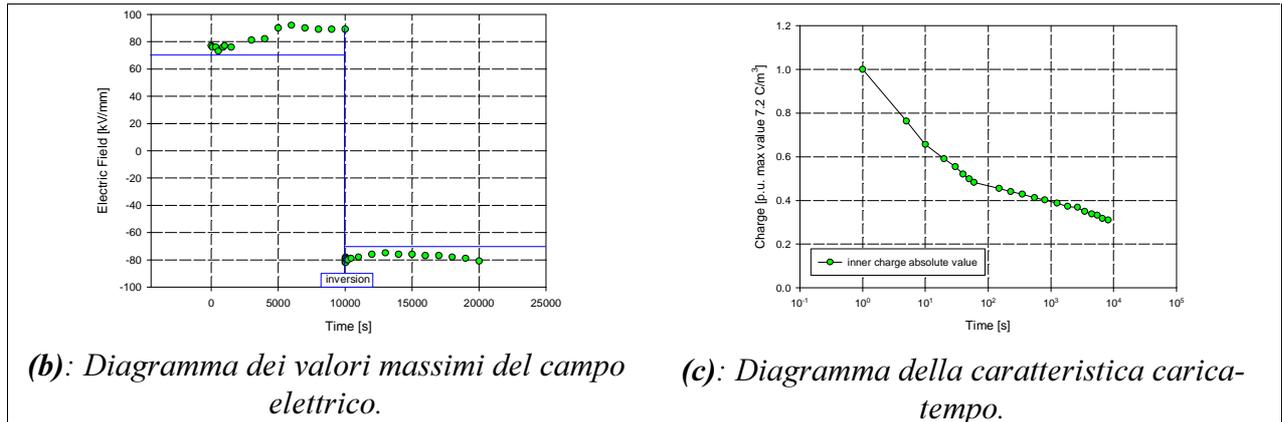
Trascorsi circa 100s dall'inversione di polarità, l'elettrodo di semiconduttivo riprende ad iniettare omocarica e gli elettroni vanno a neutralizzare parte della carica positiva precedentemente accumulata vicino all'elettrodo ed a formare eterocarica all'anodo (Fig. 4.76 (a)).

4.4.2.23 Prova con inversione di polarità sul materiale P20

Nella Fig. 4.77 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P20.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $20\text{C}/\text{m}^3$, mentre il secondo adottando $100\text{C}/\text{m}^3$.

**Figura 4.77**

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P20 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

Inizialmente il materiale presenta eterocarica al catodo; dopo poche decine di secondi l'anodo comincia a deiettare elettroni e le lacune liberate si distribuiscono progressivamente all'interno del materiale richiamando sempre maggior carica negativa al catodo (Fig. 4.77 (a)).

Durante l'inversione si ha la progressiva neutralizzazione della carica positiva e la formazione di una distribuzione di carica negativa. (Fig. 4.77 (a)).

In seguito il catodo inietta portatori di carica negativa che progressivamente neutralizzano la carica positiva precedentemente accumulata vicino all'elettrodo di semiconduttivo e richiamano carica positiva all'anodo (Fig. 4.77 (a)).

4.4.2.24 Prova con inversione di polarità sul materiale P21

Nella Fig. 4.78 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P21.

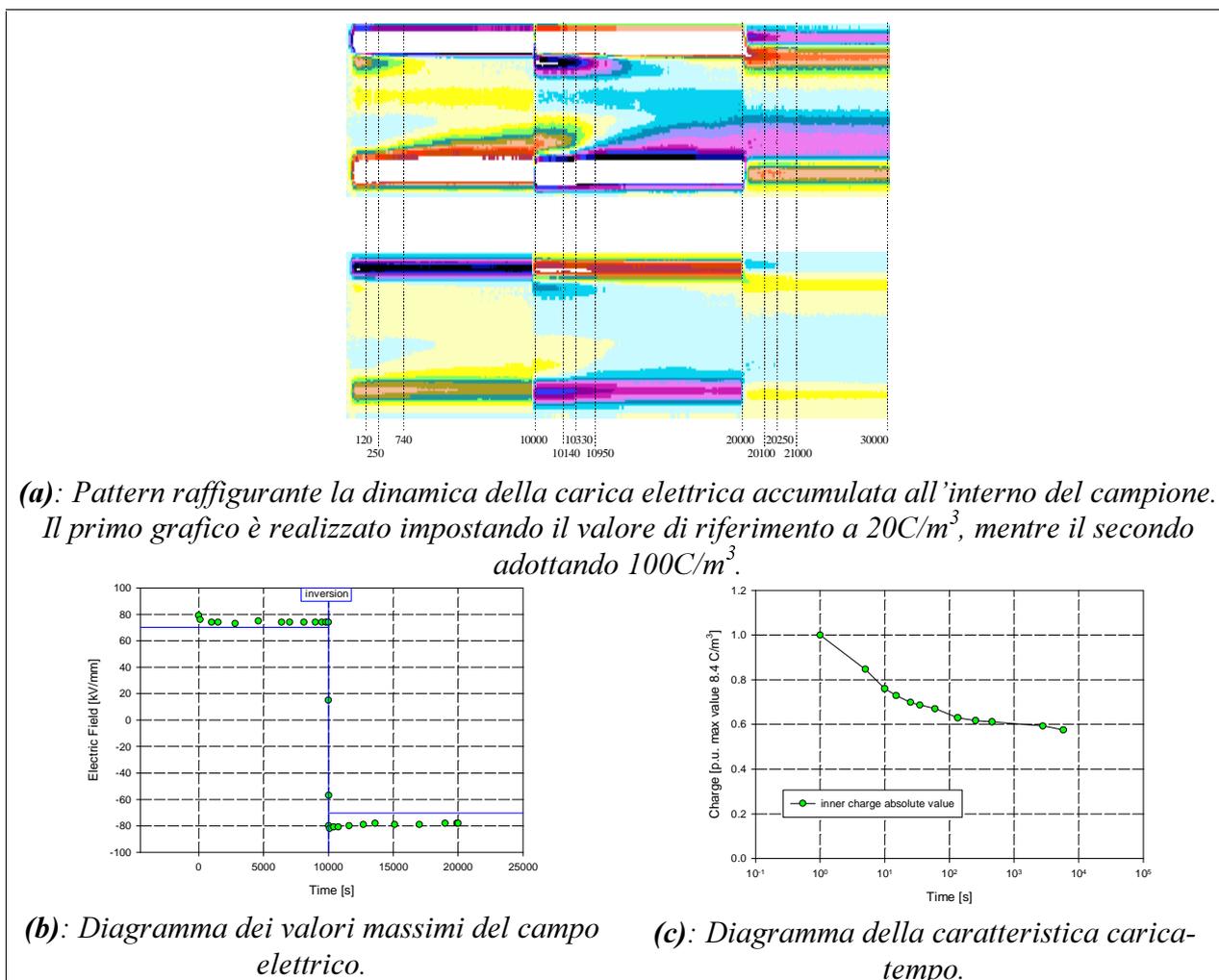


Figura 4.78

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P21 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Inizialmente il materiale presenta carica positiva vicino al catodo. Dopo i primi 100s l'elettrodo negativo diventa attivo iniettando elettroni ed andando progressivamente a neutralizzare la carica positiva iniziale. Contemporaneamente si attiva l'anodo formando una elevata omocarica (Fig. 4.78 (a)).

Il materiale presenta eterocarica durante l'inversione; ciò comporta innalzamento del campo elettrico alle interfacce rispetto al campo laplaciano.

Trascorsi 100s dopo l'inversione di polarità il catodo inietta omocarica e l'anodo deietta elettroni (Fig. 4.78 (a)). La figura 4.78 (a) mostra la dinamica con cui l'eterocarica, presente nei primi istanti dopo l'inversione di polarità, viene neutralizzata con successivo accumulo di omocarica.

Dalla Fig. 4.78 (a) si deduce che l'elettrodo maggiormente attivo è quello di semiconduttivo.

4.4.2.25 Prova con inversione di polarità sul materiale P22

Nella Fig. 4.79 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale P22.

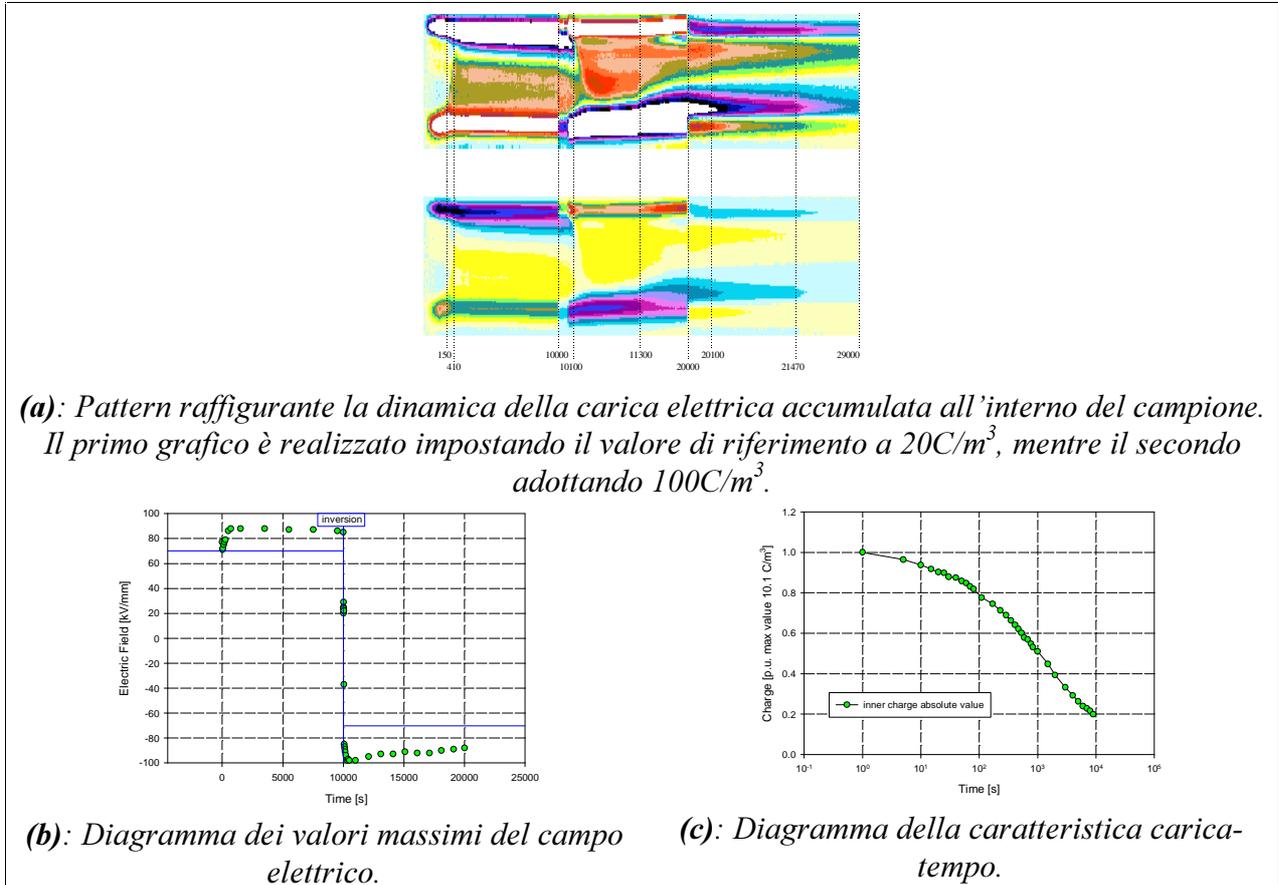


Figura 4.79

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale P22 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

La Fig. 4.79 (a) mostra la formazione di omocarica nelle vicinanze di entrambi gli elettrodi. Dalla dinamica della carica formata si evince che il catodo (semiconduttivo) è l'elettrodo maggiormente attivo (ma in questo caso entrambi i fenomeni sono molto attivi).

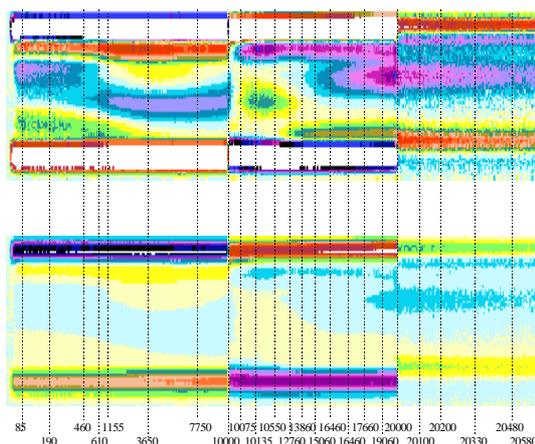
Nella Fig. 4.79 (a) si osserva la presenza di eterocarica nei primi istanti dopo l'inversione di polarità, dovuta alla carica accumulata nel corso dei primi 10000s.

Trascorsi i primi istanti dall'inversione di polarità della tensione, si ha di nuovo formazione di omocarica (Fig. 4.79 (a)). Il catodo (semiconduttivo) è l'elettrodo più attivo, tanto che la carica iniettata da quest'ultimo neutralizza parte della carica positiva presente nelle vicinanze dell'anodo.

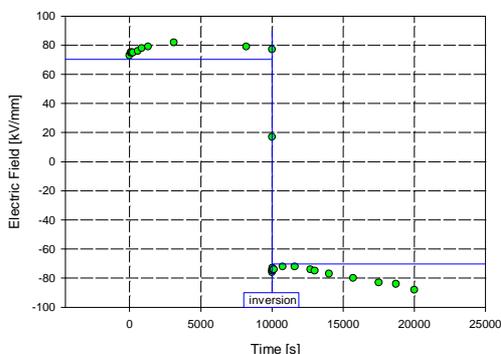
L'accumulo di omocarica comporta un campo elettrico massimo estremamente elevato durante l'inversione di polarità della tensione. In seguito all'attivazione dei processi elettrodici si riscontra un decremento del campo elettrico massimo (Fig. 4.79 (b)).

4.4.2.26 Prova con inversione di polarità sul materiale 845/22

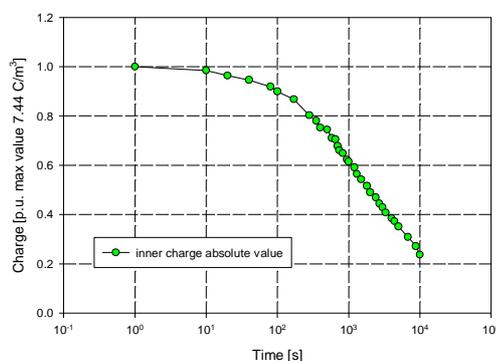
Nella Fig. 4.80 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale 845/22.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a $20C/m^3$, mentre il secondo adottando $100C/m^3$.



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico.



(c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.80

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale 845/22 a $20^{\circ}C$ con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Fin dall'inizio si osserva eterocarica al catodo (Fig. 4.80 (a)), che in seguito continua ad aumentare. Gradualmente gli elettroni migrano verso l'anodo dove, di conseguenza, aumenta la densità di carica positiva presente (la Fig. 4.80 (a) evidenzia il movimento dei portatori di carica

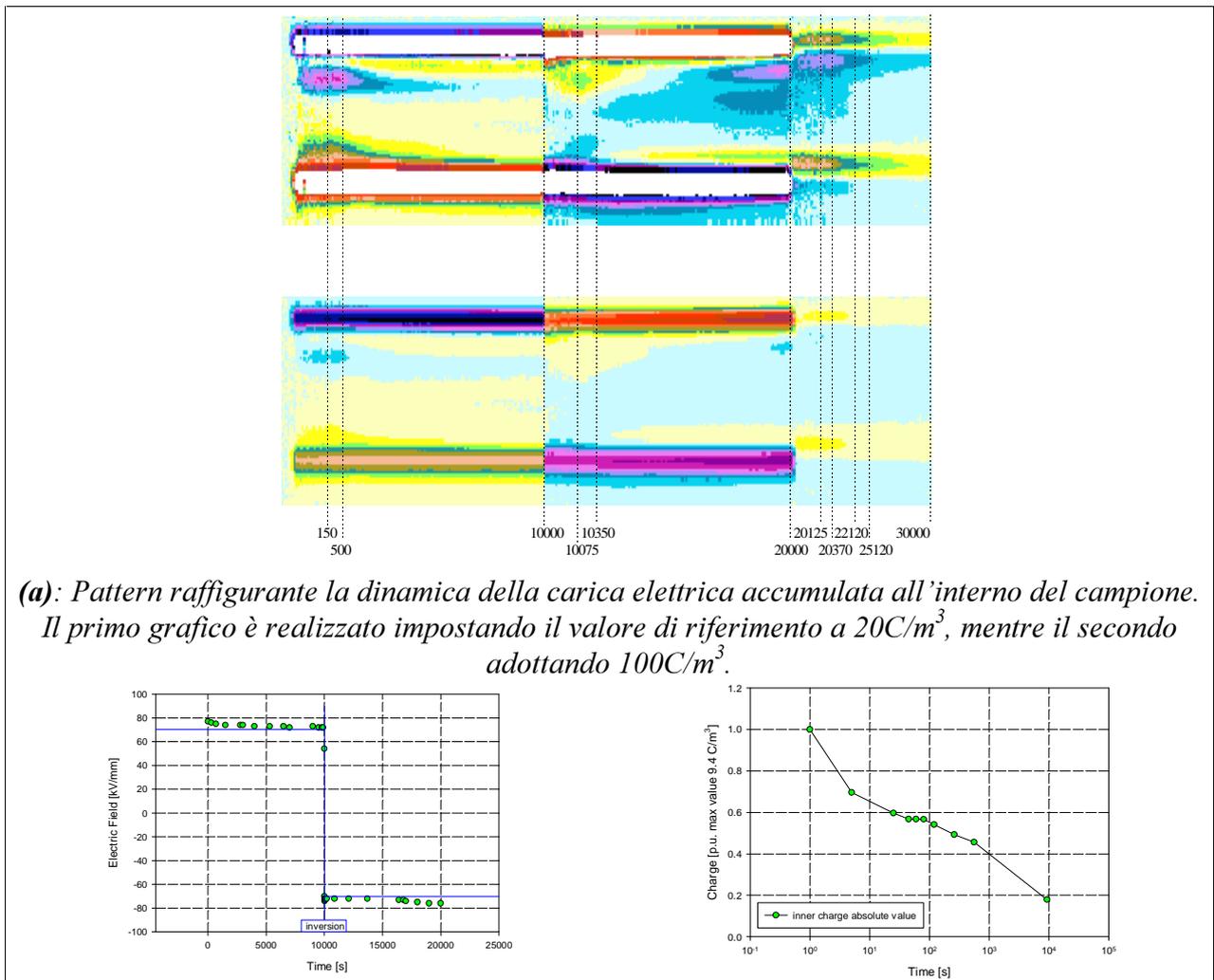
negativa verso l'anodo). L'effetto finale della dinamica all'interno del materiale è la presenza di eterocarica ad entrambi gli elettrodi.

Durante l'inversione di polarità (Fig. 4.80 (a)) si nota la formazione di eterocarica su entrambi gli elettrodi: i portatori di carica negativa, presenti vicino all'elettrodo di semiconduttivo prima dell'inversione, vengono richiamati verso l'elettrodo in alluminio. Questo spiega la presenza di carica positiva nella zona centrale del provino e l'eterocarica vicino all'anodo nei primi istanti dopo l'inversione.

La Fig. 4.80 (a) mostra la dinamica con cui portatori di carica negativa migrano verso l'anodo. Ciò porta alla formazione di eterocarica su entrambi gli elettrodi con un progressivo incremento della carica negativa accumulata all'interno del provino.

4.4.2.27 Prova con inversione di polarità sul materiale 845/22B

Nella Fig. 4.81 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale 845/22B.



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico. (c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.81

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale 845/22B a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

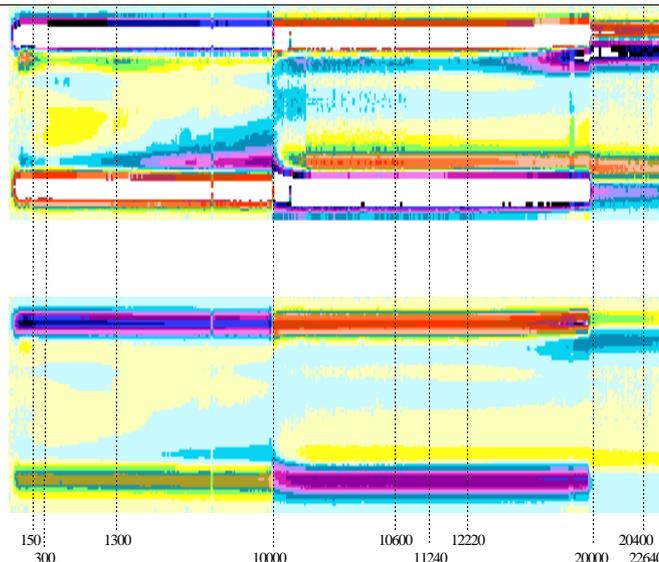
Al tempo zero si osserva un accumulo di omocarica vicino ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.81 (a)). In seguito si ha la formazione di eterocarica al catodo e gli elettroni iniettati neutralizzano gradualmente, ma non completamente, la carica positiva nel materiale restante. I portatori di carica negativa migrano progressivamente verso l'anodo neutralizzando parte dell'omocarica presente al tempo zero (la Fig. 4.81 (a) evidenzia la dinamica del comportamento sopra descritto).

La Fig. 4.81 (a) mostra la presenza iniziale di omocarica al nuovo anodo (carica accumulata prima dell'inversione di polarità).

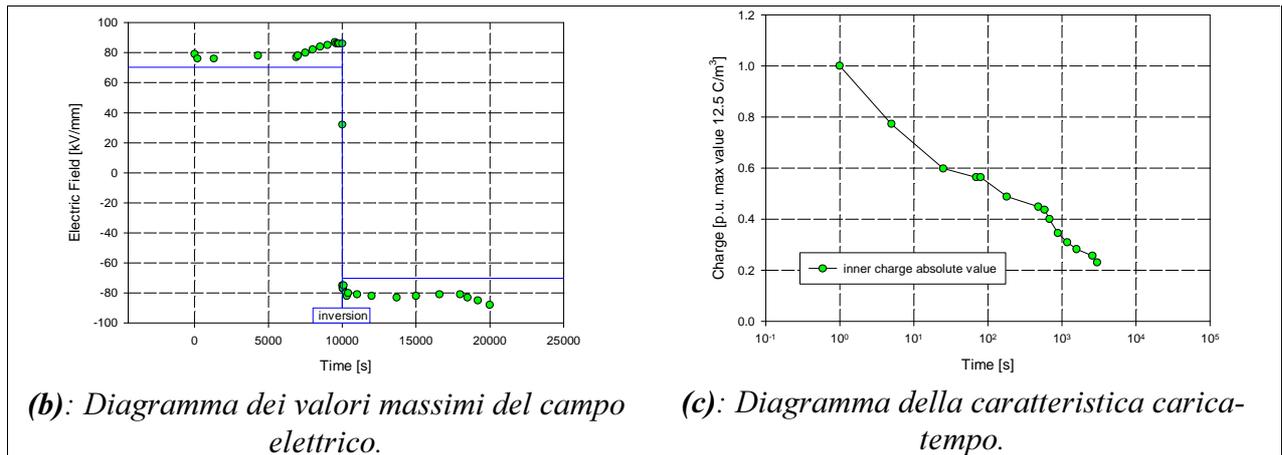
Negli istanti successivi all'inversione di polarità della tensione si nota il movimento di portatori di carica negativa verso l'elettrodo positivo (Fig. 4.81 (a)); ciò porta ad un graduale accumulo di eterocarica all'anodo ed al catodo.

4.4.2.28 Prova con inversione di polarità sul materiale 845/21

Nella Fig. 4.82 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale 845/21.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 20C/m^3 , mentre il secondo adottando 100C/m^3 .

**Figura 4.82**

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale 845/21 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm.

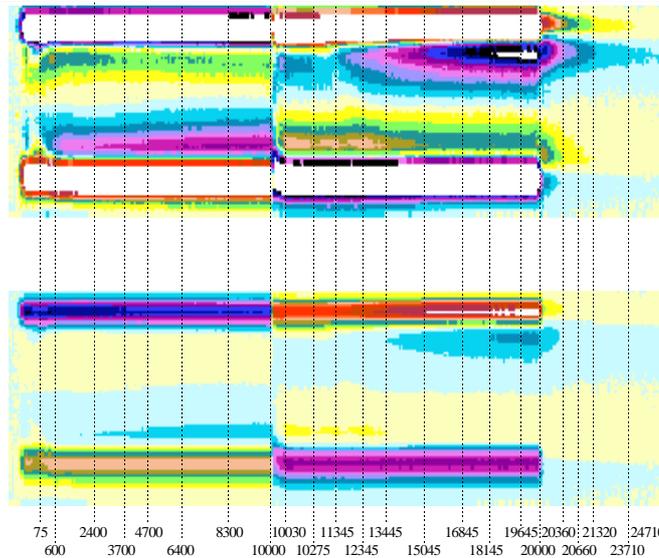
Il materiale inizialmente presenta eterocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.82 (a)). In seguito si osserva la formazione di una leggera omocarica dal catodo. I portatori di carica negativa iniettati neutralizzano parte della carica positiva presente al tempo zero vicino al catodo. Contemporaneamente all'iniezione di omocarica dal catodo, si osserva l'incremento della eterocarica all'anodo (Fig. 4.82 (a)).

Nei secondi che seguono l'inversione di polarità della tensione, si osserva formazione di eterocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.80 (a)) che in questo caso persiste fino alla conclusione della prova.

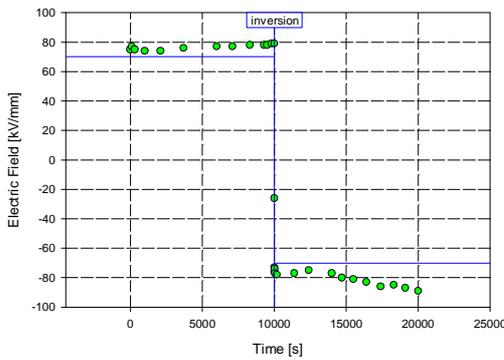
La Fig. 4.80 (a) mostra la dinamica con cui si forma eterocarica vicino all'anodo ed all'elettrodo negativo.

4.4.2.29 Prova con inversione di polarità sul materiale 845/01x

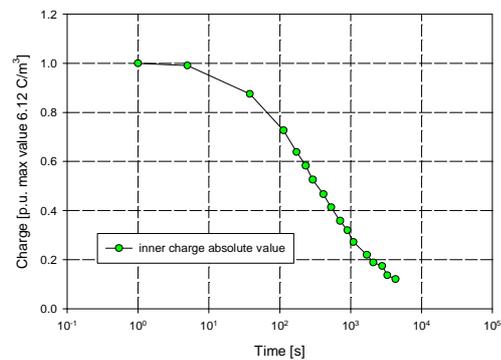
Nella Fig. 4.83 sono riportati i dati ottenuti nella prova di PEA con inversione di polarità, eseguita sul materiale 845/01x.



(a): Pattern raffigurante la dinamica della carica elettrica accumulata all'interno del campione. Il primo grafico è realizzato impostando il valore di riferimento a 20C/m^3 , mentre il secondo adottando 100C/m^3 .



(b): Diagramma dei valori massimi del campo elettrico.



(c): Diagramma della caratteristica carica-tempo.

Figura 4.83

Diagrammi riassuntivi della prova con inversione di polarità eseguita sul materiale 845/21 a 20°C con campo elettrico applicato pari a 70 kV/mm .

Il materiale inizialmente mostra la formazione di eterocarica ad entrambi gli elettrodi (Fig. 4.83 (a)). Trascorsi i primi 1000s di prova inizia ad accumularsi eterocarica all'elettrodo positivo. La Fig. 4.83 (a) mostra che il meccanismo di accumulo di carica è dominato da processi elettrodoici all'anodo (semiconduttivo), i quali richiamano portatori di carica negativi verso l'elettrodo positivo portando alla formazione di eterocarica anche in prossimità all'elettrodo negativo.

Negli istanti successivi all'inversione la carica precedentemente accumulata porta ad avere un accumulo iniziale di omocarica; in seguito si ha un movimento di portatori di carica che produce una distribuzione di carica analoga a quella presente prima dell'inversione.

Dopo 180s dall'inversione di polarità, il meccanismo di accumulo di carica è dominato da processi elettrolici all'anodo (alluminio), i quali richiamano portatori di carica negativi verso l'elettrodo formando eterocarica (Fig. 4.83 (a)).