



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero della Transizione Ecologica



Ricerca di Sistema elettrico

Sicurezza elettrica di tamponature con accumulo elettrico integrato

Davide Fabiani, Fabrizio Palmieri



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Report RdS/PTR2021/137

Sicurezza elettrica di tamponature con accumulo elettrico integrato

Davide Fabiani e Fabrizio Palmieri (Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", DEI)

Con il contributo di: prof. Leonardo Sandrolini– Università di Bologna

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto 1.5: - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti

Work package 3: Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici

Linea di attività 3.21: Studio della sicurezza elettrica delle tamponature

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Ing. Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Caratterizzazione elettromagnetica di tamponature per edilizia con accumulo energetico integrato"

Responsabile scientifico Università di Bologna: prof. Davide Fabiani



Responsabile scientifico ENEA: ing. Marcello Artioli

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 CAUSE DEL FUNZIONAMENTO DIFETTOSO DELL'ISOLAMENTO E RISCHIO INCENDIO	5
3 MISURA D'ISOLAMENTO E FATTORI CHE LA INFLUENZANO.....	7
4 METODI DI MISURA DELLA RESISTENZA DI ISOLAMENTO	8
4.1 MISURA A BREVE TERMINE	8
4.2 METODI DI MISURA BASATI SULL'INFLUENZA DEL TEMPO DI APPLICAZIONE DELLA TENSIONE DI PROVA	9
4.3 INDICE DI POLARIZZAZIONE (PI).....	9
4.4 RAPPORTO DI ASSORBIMENTO DIELETTRICO (DAR)	10
4.5 METODO BASATO SULL'INFLUENZA DELLA VARIAZIONE DELLA TENSIONE DI PROVA (MISURA A RAMP)	10
4.6 METODO DI TEST DI SCARICA DIELETTRICA (DD)	10
5 PROVE SPERIMENTALI SUL CAMPIONE	11
5.1 MISURA DELLA CAPACITÀ E DEL FATTORE DI PERDITA TANDELTA	12
5.2 MISURA DEI PARAMETRI LEGATI ALL'ISOLAMENTO (RESISTENZA DI ISOLAMENTO, INDICE DI POLARIZZAZIONE PI).....	12
5.3 TEST DI TENUTA DIELETTRICA	13
6 RISULTATI SPERIMENTALI	13
6.1 MISURE DELLA RESISTENZA DI ISOLAMENTO	13
6.2 MISURE DI CAPACITÀ E TANDELTA	21
6.3 TEST DI TENUTA DIELETTRICA	26
7 CONCLUSIONI.....	27
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27
9 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	27
10 APPENDICE.....	28

Sommario

La sicurezza elettrica dei condensatori utilizzati nei prototipi delle tamponature realizzati nelle linee di attività LA 3.17 e LA 3.18 di ENEA è stato studiato da un punto di vista sperimentale e modellistico presso il Laboratory of Innovative Materials for Electrical Systems - LIMES del Dipartimento DEI dell'Università di Bologna. Le prove sono state realizzate su un campione di tamponatura realizzato in legno all'interno del quale è collocato un condensatore da 1000 μ F. Si è analizzata la normativa dei condensatori per applicazioni di potenza e si è appurato che non sono previsti specifici test per la valutazione della resistenza di isolamento. Vista, però, l'importanza di garantire che il campione, durante il funzionamento anche in condizioni ambientali di temperatura e umidità estreme, non trasferisca all'esterno un potenziale pericoloso in caso di contatto indiretto, si sono studiati opportuni protocolli di prova proposti nelle norme. Si è deciso di utilizzare la misura della resistenza di isolamento a 1 min e 10 min e il relativo indice di polarizzazione. Dalle misure effettuate si è visto che la resistenza di isolamento varia notevolmente con l'umidità ambientale, diminuendo di quasi sei ordine di grandezza passando dal 30% al 90% di umidità relativa, mantenendosi comunque al di sopra del valore minimo per la sicurezza di 1 M Ω per tutto il tempo di prova. Si è osservato che la temperatura riduce significativamente la resistenza di isolamento, circa tre ordini di grandezza in meno da 20°C a 110°C, rimanendo comunque abbondantemente al di sopra dei valori di sicurezza. Inoltre, il fattore di perdita, tandelta, cresce di circa il 30% nelle condizioni di umidità maggiori, mentre la capacità rimane circa costante. Il campione, al termine di ogni test, ha passato tutte le prove di tenuta, mostrando quindi di non aver subito una degradazione significativa anche nelle condizioni di prova più gravose e mantenendo, quindi, dei livelli accettabili di sicurezza elettrica.

1 Introduzione

Tutte le apparecchiature di un impianto elettrico devono rispettare determinate caratteristiche d'isolamento per garantire il loro funzionamento nella massima sicurezza.

La qualità dell'isolamento si modifica nel corso degli anni a causa delle sollecitazioni elettriche e meccaniche a cui sono sottoposte le apparecchiature. Tale alterazione provoca una riduzione della resistività elettrica dei materiali isolanti, creando un aumento delle correnti di dispersione, che possono causare gravi incidenti agli utilizzatori e arresti improvvisi della produzione. Oltre alle misure effettuate in fase di controllo su materiali nuovi e/o rigenerati, la verifica periodica dell'isolamento permette un'analisi preventiva contro tali incidenti volta a rilevare il degrado precoce delle caratteristiche dell'isolamento prima che raggiunga un livello insufficiente ("manutenzione preventiva"). È necessario fare distinzione tra la prova di tenuta dielettrica e la misura di resistenza d'isolamento: spesso confuse l'una con l'altra [1].

La prova di tenuta dielettrica esprime la capacità di un isolante di sopportare una sovratensione di media durata senza produrre una scarica verso terra. Questa sovratensione può essere causata da un fulmine o generata da un difetto sulla linea di trasmissione dell'energia. L'obiettivo principale di questa prova consiste nel verificare che le procedure di costruzione dei materiali e le distanze dell'isolamento siano state rispettate. Spesso la prova si effettua applicando una tensione in alternata, ma è possibile utilizzare anche una tensione in continua. L'apparecchio idoneo a questo tipo di misura è il dielettrometro. Il risultato ottenuto è un valore di tensione il più delle volte espresso in kV, e presenta un carattere più o meno distruttivo a seconda dei livelli di test (prove di qualità o manutenzione) [1].

Per questa ragione il test dielettrico viene eseguito su apparecchiature nuove oppure rigenerate.

La misura della resistenza d'isolamento non è considerata distruttiva nelle normali condizioni di test. Viene eseguita applicando una tensione in continua di valore inferiore al test dielettrico, ottenendo un risultato espresso in resistenza (Ω). Questo valore di resistenza esprime la qualità dell'isolamento fra due elementi conduttori. La sua natura non distruttiva la rende particolarmente adatta al controllo dell'invecchiamento degli isolanti durante il normale periodo di esercizio di un'apparecchiatura o di un impianto elettrico. Questa misura si effettua applicando il metodo voltamperometrico al dispositivo in prova.

Nel caso in esame di un condensatore per l'accumulo di energia elettrica inserito all'interno di un componente di tamponamento, la sicurezza riguarda principalmente:

- il rischio incendio, nel caso in cui la temperatura del condensatore cresca indefinitamente per effetto della cosiddetta instabilità termica
- il rischio elettrico, se il tamponamento trasferisce sulla superficie esterna delle tensioni pericolose a causa della riduzione della resistenza di isolamento. Questa resistenza di isolamento, infatti, può modificarsi durante il funzionamento del dispositivo a causa dell'invecchiamento dei materiali ma soprattutto per effetto delle condizioni ambientali di temperatura e umidità.

Mentre per il primo rischio, come si dirà più avanti, possono essere prese delle misure di sicurezza preventive, per il rischio elettrico è fondamentale una misura approfondita della resistenza di isolamento in varie condizioni di funzionamento. Essendo l'applicazione a cui fa riferimento l'oggetto in prova molto innovativa, la normativa di riferimento specifica è molto carente. Generalmente per i condensatori di potenza si applica la norma IEC 61071:2017 [2]. Tale norma però non contiene al suo interno specifiche direttive legate alla misura della resistenza di isolamento tra i terminali del condensatore e l'involucro esterno, situazione che simula la perdita di isolamento del sistema di tamponamento con il conseguente trasferimento all'esterno di una tensione pericolosa. Pertanto, tali prove sono state realizzate costruendo un opportuno protocollo di prove prendendo ispirazione dal circuito di misura utilizzato dalla norma CEI EN 62631 [3, 4], come verrà descritto più avanti.

2 Cause del funzionamento difettoso dell'isolamento e rischio incendio

La misura d'isolamento trova applicazione nella manutenzione preventiva, che analizza le possibili cause di degrado delle prestazioni della resistenza di isolamento, e quindi attivare le procedure necessarie agli interventi sui materiali. È possibile classificare i difetti d'isolamento in cinque gruppi, che a seconda del livello di severità indicano il rischio d'incidenti precedentemente illustrati.

- Stress d'origine elettrica, principalmente correlati a fenomeni di sovratensione, transitori o permanenti.
- Stress d'origine meccanica, principalmente localizzati durante le frequenti manovre di marcia/arresto, oppure l'installazione del componente o a seguito di elevate correnti di guasto.
- Stress d'origine chimica: le prestazioni dell'isolamento dei materiali sono compromesse dalla vicinanza di prodotti chimici, oli, vapori corrosivi e polvere.
- Stress correlati alle variazioni di temperatura: durante gli stress meccanici dovuti alle sequenze di marcia/arresto delle apparecchiature, le temperature estreme comportano dilatazioni e/o contrazioni che compromettono le caratteristiche degli isolanti, comportando un fattore d'invecchiamento dei materiali.
- Contaminazioni ambientali: lo stoccaggio o l'utilizzo di un isolante elettrico in ambienti umidi e caldi, può portare al deterioramento delle caratteristiche d'isolamento dei materiali e degli impianti.

Per quanto concerne il rischio incendio, invece, l'instabilità termica nel condensatore avviene se il materiale isolante viene esposto durante il funzionamento ad una temperatura eccessiva e/o a un campo elettrico molto elevato. Le perdite dielettriche per unità di volume (in W/m^3), p , infatti, sono espresse dall'equazione seguente [5]:

$$p = \sigma E^2 + 2\pi f \epsilon'' E^2 \quad (2.1)$$

ove σ =conducibilità elettrica dell'isolante, E =campo elettrico applicato, f =frequenza ϵ'' = parte immaginaria della permittività che tiene conto delle perdite per isteresi elettrica del materiale.

Si fa notare che tali perdite p devono essere smaltite dal sistema isolante per consentire di raggiungere una temperatura di equilibrio entro il range di temperature sopportabili dal film di polipropilene di cui è costituito il condensatore, tipicamente $< 100^\circ C$.

In DC le perdite sono minimizzate perché il secondo termine della (2.1) è nullo per $f=0$, ma non sono comunque nulle perché sono legate alla conducibilità dell'isolante che cresce esponenzialmente con la temperatura secondo la nota formula:

$$\sigma = \sigma_0 \exp [a(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (2.2)$$

dove ϑ_0 = temperatura di riferimento, solitamente la temperatura ambiente, a cui corrisponde una conducibilità elettrica σ_0 , ϑ = temperatura di funzionamento dell'isolante, a cui corrisponde la conducibilità σ .

Si può osservare che al crescere della temperatura le perdite crescono esponenzialmente e dipendono dal quadrato del campo elettrico. Il campo elettrico di progetto di un condensatore è normalmente molto elevato, ad esempio tra i 150 kV/mm e 200 kV/mm. Se le condizioni di smaltimento termico non sono sufficienti, la temperatura interna del condensatore cresce, e con essa la conducibilità in modo esponenziale (eq. (2.2)). La crescita della conducibilità, per la (2.1), fa crescere le perdite e con esse la temperatura, se il condensatore non è in grado di dissiparle adeguatamente. Si crea quindi una retroazione positiva, che porta rapidamente ad una crescita incontrollata della temperatura e che alla fine fa perdere al dielettrico le proprietà isolanti, portando quindi al cortocircuito del componente che può incendiarsi o esplodere a causa del rilascio istantaneo di tutta l'energia immagazzinata.

Questo fenomeno può comunque essere evitato se si progetta il condensatore ad un campo elettrico che consenta un opportuno margine di sicurezza, ovvero che le perdite dielettriche siano basse e che la temperatura a cui si porta il condensatore nel funzionamento normale sia sufficientemente bassa, diciamo al di sotto di $60-70^\circ C$.

A garanzia di sicurezza, si può pensare, inoltre, di installare un sensore di temperatura che possa monitorare eventuali sovratemperature, disalimentando il dispositivo in caso di crescita anomala della temperatura che possa costituire un problema per la sicurezza del condensatore.

3 Misura d'isolamento e fattori che la influenzano

La misura della resistenza d'isolamento viene normalmente effettuata mediante metodo voltamperometrica basato sulla legge di Ohm. Applicando una tensione continua di valore conosciuto ed inferiore a quello della prova dielettrica, si misura la corrente circolante, e si determina il valore della resistenza. Per principio la resistenza d'isolamento presenta un valore molto elevato ma non infinito e quindi, con la misura della debole corrente circolante, tramite un amperometro molto sensibile si può ricavare il valore della resistenza d'isolamento, nota la tensione applicata. Questo valore di resistenza esprime la qualità dell'isolamento fra due elementi conduttori oppure tra un conduttore e la massa esterna e fornisce una buona indicazione sugli eventuali rischi della circolazione di correnti di dispersione.

Quando si applica una tensione costante al circuito testato, la misura di resistenza ed il valore di corrente vengono influenzati. Alcuni fattori, come ad esempio la temperatura o l'umidità, possono modificare notevolmente la misura. In un primo tempo analizzeremo, nell'ipotesi che non ci siano fattori di influenza, la natura delle correnti circolanti durante la misura d'isolamento.

La corrente totale circolante nel corpo dell'isolante è la somma di tre componenti:

- La corrente di carica capacitiva, che corrisponde alla carica della capacità dell'isolamento testato. Questa corrente ha un andamento transitorio: all'inizio della misura ha un valore elevato, che decresce esponenzialmente verso zero quando il circuito si carica elettricamente (simile alla carica di un condensatore). Si consiglia di attendere qualche secondo per consentire al valore di corrente residua di ridursi in modo trascurabile rispetto alla corrente da misurare.
- La corrente di assorbimento, che corrisponde all'energia necessaria alle molecole dell'isolante per riorientarsi sotto l'effetto del campo elettrico applicato. Questa corrente decresce molto più lentamente della corrente di carica capacitiva e richiede alcuni minuti per raggiungere un valore vicino allo zero.
- La corrente di dispersione o corrente di conduzione. Questa corrente caratterizza la qualità dell'isolamento, ed è stabile nel tempo.

La Fig. 3.1 illustra l'andamento di queste tre correnti in funzione del tempo (la scala dei tempo è indicativa e può variare in funzione del materiale testato).

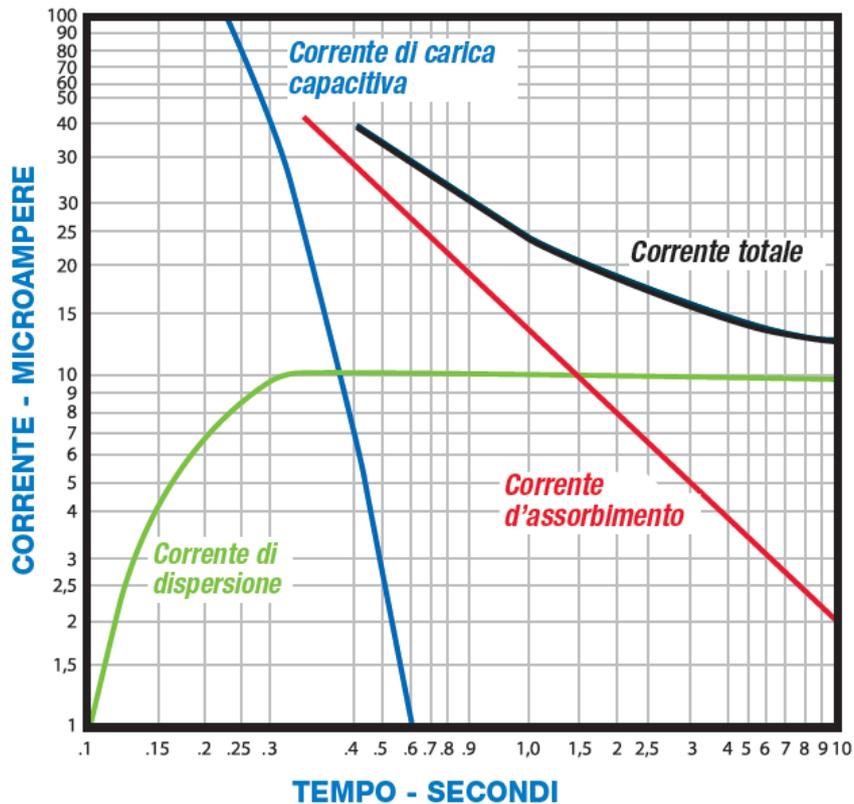


Fig.3.1: Componenti della corrente misurate durante una prova voltamperometrica [1].

La corrente totale circolante nel circuito testato, creata dall'applicazione costante della tensione, subisce una variazione nel tempo, che comporta un'instabilità del valore della resistenza.

Prima di trattare dettagliatamente i vari metodi di misura, occorre soffermarsi sui fattori d'influenza della misura di resistenza d'isolamento.

La temperatura fa variare il valore della resistenza d'isolamento secondo una legge pressoché esponenziale, come si è visto per la conducibilità dell'isolante. Nell'ambito di un programma di manutenzione preventiva occorre effettuare misure in condizioni di temperatura costanti, oppure qualora fosse impossibile, è opportuno correggerle per riportarle ad una condizione di temperatura di riferimento. Per esempio, un aumento di 10 °C dimezza il valore della resistenza d'isolamento e inversamente una diminuzione di 10 °C della temperatura raddoppia il già menzionato valore.

Il tasso d'umidità influenza l'isolamento in funzione del livello di contaminazione delle superfici isolanti. Generalmente è bene effettuare misure di resistenza d'isolamento se la temperatura non è inferiore a quella del punto di rugiada.

Quando si misura la resistenza di isolamento di un dispositivo ai fini della sicurezza, tuttavia, bisogna tenere conto del fatto che umidità e temperatura possono ridurla significativamente; pertanto, è necessario progettare opportune prove atte a simulare le condizioni più gravose per verificare che i valori di isolamento in tali condizioni siano sufficienti a non trasferire tensioni pericolose sul dispositivo.

4 Metodi di misura della resistenza di isolamento

4.1 Misura a breve termine

Si tratta del metodo più semplice, e consiste nell'applicare una tensione di test per un breve tempo (30 o 60 secondi) quindi si rileva il valore istantaneo della resistenza d'isolamento. Come precedentemente indicato,

questa misura diretta della resistenza d'isolamento è molto influenzata dalla temperatura e dall'umidità; occorre quindi normalizzare la misura ad una temperatura standard e rilevare il livello d'umidità per confrontare il risultato ottenuto alle misure precedenti. Mediante questo metodo è possibile analizzare la tendenza che, nel corso del tempo, rappresenta più efficacemente l'evoluzione delle caratteristiche d'isolamento dell'apparecchiatura testata. È possibile anche rapportare il valore ottenuto alle soglie minime da rispettare per una corretta valutazione (indicate nelle norme relative agli impianti o i materiali elettrici). Se le condizioni di misura restano stabili (medesima tensione di test, medesimo tempo di misura, ecc.) l'interpretazione dell'andamento delle misure periodiche permette di ottenere una buona diagnostica sull'isolamento dell'impianto o del materiale. Oltre a questo valore assoluto, è opportuno analizzare la variazione in funzione del tempo: un valore d'isolamento relativamente debole ma molto stabile è meno allarmante di una misura instabile nel tempo, nonostante il suo valore risulti essere al di sopra dei minimi raccomandati. In ogni caso, qualsiasi abbassamento repentino del valore della resistenza d'isolamento indica un problema da rilevare.

4.2 Metodi di misura basati sull'influenza del tempo di applicazione della tensione di prova

Questi metodi consistono nel rilevare in tempi prestabiliti i valori di resistenza d'isolamento.

Essi presentano il pregio di essere poco influenzati dalla temperatura, il che li rende facilmente applicabili senza necessità di rettificare i risultati, con riserva che l'apparecchiatura di test non subisca significative variazioni di temperatura durante il periodo della prova. Questi metodi si adattano alla manutenzione preventiva delle macchine rotanti e alla sorveglianza dei materiali di isolamento.

Nel caso di isolante in buono stato, la corrente di dispersione o corrente di conduzione è debole e la misura risulta fortemente influenzata dalle correnti di carica capacitiva e di assorbimento dielettrico. La misura della resistenza d'isolamento sarà quindi crescente per il tempo di applicazione della tensione di prova, con le correnti parassite in decremento. In funzione della natura degli isolanti avremo un tempo base di applicazione durante il quale la misura sarà più stabile. In caso d'isolamento difettoso (es.: degrado, sporcizia, umidità), la corrente di dispersione o corrente di conduzione è molto forte, ed aumenta le variazioni dovute alle correnti di carica capacitiva e d'assorbimento dielettrico. La misura della resistenza d'isolamento, quindi, raggiungerà rapidamente un valore di misura costante e stabile. Analizzando le variazioni del valore della resistenza di isolamento in funzione della durata dell'applicazione della tensione di prova, è possibile determinare la qualità dell'isolamento. Questo metodo permette di ipotizzare il degrado della misura d'isolamento anche in assenza di una cronologia. L'analisi delle variazioni, nel caso della misura a breve termine, fornisce informazioni valide solamente in caso di forti e bruschi cambiamenti dei valori e l'assenza di un evento esterno identificato.

4.3 Indice di polarizzazione (PI)

Le misure effettuate con variazione del tempo di applicazione della tensione di prova, possono essere suddivise in due rilevamenti: a 1 minuto e a 10 minuti. Il rapporto tra la resistenza d'isolamento a 10 minuti e quella ad 1 minuto si chiama Indice di Polarizzazione (PI) che permette di definire la qualità dell'isolamento.

$$PI = R_{\text{isolamento a 10 minuti}} / R_{\text{isolamento a 1 minuto}} \quad (4.1)$$

Un valore molto basso dell'indice di polarizzazione, vicino a 1, indica una corrente di polarizzazione dominata dal contributo dovuto alla corrente di dispersione ed è un indice di un potenziale problema del sistema isolante, ad es. a causa di una riduzione dell'isolamento superficiale per sporcizia, umidità o deterioramento dell'isolamento. È importante comprendere che il metodo di misura mediante calcolo dell'indice di polarizzazione si adatta al controllo di materiali isolanti "solidi"; non è raccomandato per le apparecchiature, come per esempio trasformatori ad olio o condensatori in carta e olio, sui quali darebbe scarsi risultati anche in caso di buone condizioni d'isolamento.

4.4 Rapporto di assorbimento dielettrico (DAR)

Per impianti o apparecchiature dotati di materiali isolanti nei quali la corrente di assorbimento diminuisce rapidamente, la misura delle resistenze di isolamento con tempi di 30 secondi e 60 secondi può essere sufficiente a qualificare lo stato dell'isolamento. Il DAR si definisce come segue:

$$DAR = R_{\text{isolamento a 60 secondi}} / R_{\text{isolamento a 30 secondi}} \quad (4.2)$$

Se $DAR < 1.25$ l'isolamento è insufficiente, $DAR < 1.6$ isolamento OK, $DAR > 1.6$ isolamento eccellente.

4.5 Metodo basato sull'influenza della variazione della tensione di prova (misura a rampa)

La presenza di elementi contaminanti (es.: polvere, sporcizia, ecc.) o di umidità sulla superficie degli isolanti è generalmente rilevata con le misure basate sul tempo d'applicazione della tensione di prova (PI, DAR...).

Ciò nonostante, l'invecchiamento degli isolanti o danni meccanici possono talvolta passare inosservati se si utilizza questa prova perché si applica una tensione debole rispetto alla tensione dielettrica utilizzata per testare l'isolante. Aumentando troppo la tensione di prova applicata si possono invece causare le rotture di questi punti deboli, provocando una diminuzione sensibile del valore dell'isolamento misurato.

Per essere efficace, il valore di tensione deve avere un rapporto da 1 a 5, ed ogni gradino dovrà essere di durata identica di 1 minuto pur rimanendo ben al di sotto della tensione di prova dielettrica standard (2 Un + 1000 V). I risultati di questo metodo sono totalmente indipendenti dalla natura degli isolanti e dalla temperatura perché non si basano sul valore intrinseco degli isolamenti misurati ma sulla diminuzione effettiva del valore letto in un periodo di tempo uguale, con due valori di tensione di prova diversi. La diminuzione del 25 % (o superiore) fra il valore di resistenza d'isolamento al primo gradino e quello al secondo è un segno di degrado dell'isolamento solitamente correlato alla presenza di anomalie.

4.6 Metodo di test di scarica dielettrica (DD)

Il test di scarica dielettrica DD si effettua misurando la corrente durante la scarica dielettrica dell'apparecchiatura. Poiché i tre componenti della corrente (carica capacitiva, polarizzazione e dispersione) sono presenti durante la misura dell'isolamento, il valore della corrente di polarizzazione o di assorbimento è potenzialmente influenzato dalla presenza della corrente di dispersione.

Pertanto, anziché misurare la corrente di polarizzazione durante il test d'isolamento, il test di scarica dielettrica (DD) misura la corrente di de-polarizzazione e la corrente di scarica capacitiva al termine della misura di isolamento. Il principio di misura è il seguente: il dispositivo da testare viene caricato per una durata sufficiente a raggiungere un valore stabile (circola solo la corrente di dispersione e sono terminate la carica capacitiva e la polarizzazione). Successivamente si scarica il dispositivo attraverso una resistenza interna del megaohmmetro e si misura la corrente circolante. Questa corrente è costituita dalle correnti di scarica capacitiva e di ri-assorbimento che forniscono la scarica dielettrica totale e si misura dopo un tempo standard di almeno 1 minuto. La stessa dipende dalla capacità globale e dalla tensione finale del test.

Il valore DD si calcola secondo la formula:

$$DD = C_{\text{Corrente a 1 minuto}} / (T_{\text{Tensione di test}} \times C_{\text{Capacità}}) \quad (4.3)$$

Il test DD può identificare eccessi di corrente di scarica che si manifestano quando uno degli strati dell'isolante è danneggiato o difettoso; difetto che può passare inosservato durante le misure standard o nei test di tipo PI e DAR. La corrente di scarica sarà superiore per una tensione di prova e una capacità conosciute,

e se uno degli strati dell'isolamento è difettoso. La costante di tempo di questo singolo strato non sarà più in relazione con quella degli altri strati, il che provoca un aumento del valore della corrente rispetto all'isolamento corretto. Un isolamento omogeneo presenterà un valore DD uguale a zero, un isolamento multistrato corretto presenterà un valore di DD che può raggiungere 2. La tabella 4.1 indica la qualità dell'isolamento in funzione del valore di DD ottenuto.

Tab. 4.1: Esito della prova DD

> 7 Scadente
4 a 7 Mediocre
2 a 4 da sorvegliare
< 2 OK

Attenzione: questo metodo di misura dipende dalla temperatura, occorrerà perciò effettuare il test ad una temperatura standard o comunque memorizzare il valore di temperatura con il risultato del test.

5 Prove sperimentali sul campione

Il dispositivo in prova è costituito da un condensatore DC-Link Capacitor C4E, realizzato da KEMET, di capacità pari a 1000 μF a 900 V DC racchiuso all'interno di un involucro di legno, che simula il tamponamento. Il "mattoncino" così realizzato è dotato di 4 elettrodi disposti alle estremità dei lati corti, che consentono la messa in parallelo di più condensatori per aumentare la capacità di accumulo complessiva (si veda Fig. 5.1). Fondamentale per la sicurezza elettrica risulta la resistenza di isolamento tra tali elettrodi metallici, normalmente a 900 V DC, e l'involucro del prototipo che, una volta inserito nel muro, potrebbe trasferire dei potenziali pericolosi ad una persona che lo toccasse in caso di un difetto di isolamento.

Poiché, come si è detto nelle sezioni precedenti, l'isolamento è fortemente condizionato dalle condizioni ambientali, cioè peggiora alle alte temperature e con elevata umidità, risulta fondamentale verificare che il mattone non trasferisca potenziali pericolosi anche in condizioni estreme di umidità e temperatura. Tali condizioni sono state simulate inserendo il campione in una camera climatica per diversi giorni misurando a intervalli di tempo regolari la resistenza di isolamento, l'indice di polarizzazione PI, fattore di scarica dielettrica DD, la capacità e il fattore di perdita tandelta. Di seguito vengono descritti i circuiti di misura utilizzati.



Fig. 5.1: Immagine del prototipo di tamponamento contenente il condensatore su cui sono state fatte le prove di sicurezza elettrica

5.1 Misura della capacità e del fattore di perdita tandelta

La capacità e il tandelta, nelle varie condizioni di prova, sono state misurate utilizzando lo strumento Altanova TDX 5000, a cui è stato collegato il condensatore in prova prima della fase di polarizzazione/depolarizzazione per la misura dei parametri legati all'isolamento. Lo strumento di misura utilizzato è rappresentato in Fig. 5.2.



Fig. 5.2: Strumento utilizzato per la misura della capacità e tandelta durante le prove

5.2 Misura dei parametri legati all'isolamento (resistenza di isolamento, indice di polarizzazione PI)

I parametri legati all'isolamento sono stati misurati effettuando una prova voltamperometrica costituente in una fase di carica della durata massima di 10 minuti e in una scarica di pari durata. Il circuito utilizzato è rappresentato in Figura 5.3 [3, 4].

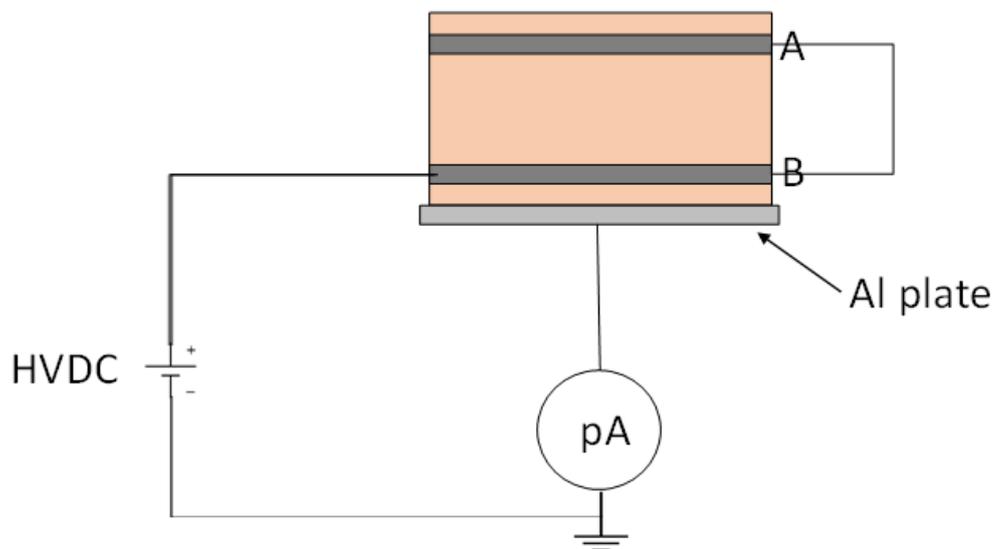


Fig. 5.3: Circuito di prova per la misura della resistenza di isolamento

I due elettrodi del condensatore (A e B) sono stati cortocircuitati e collegati all'elettrodo di alta tensione di generatore in continua HVDC *Keithley 2290E-5* che fornisce una tensione variabile tra 0 e 5000 V. Un picoamperometro *Keysight B9281A* è collegato all'involucro esterno del prototipo appoggiato su un supporto

di alluminio. L'altro elettrodo del picoamperometro è collegato alla stessa terra del generatore di alta tensione. La fase di polarizzazione è stata eseguita ad una tensione di $V = 1000$ V DC.

La resistenza di isolamento è stata calcolata mediante la seguente equazione:

$$R = \frac{V}{I} \quad (5.1)$$

dove V è la tensione di prova e I la corrente misurata. Poiché la corrente varia a causa del transitorio di polarizzazione del condensatore, le norme indicano di effettuare la misura a 1 minuto e ripeterla a 10 min. Come valore di resistenza di isolamento, normalmente, si considera quello che deriva dall'equazione (5.1), inserendo per la corrente il valore misurato a 10 min, R_{10} , ma a volte anche il valore a 1 min, R_1 , può essere di interesse. In particolare, il valore a 1 min è utile per calcolare l'indice di polarizzazione, PI, definito come segue:

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (5.2)$$

Dove R_{10} = resistenza di isolamento precedentemente definita e R_1 = valore ricavato dall'equazione (5.1) con I = corrente misurata dopo 1 minuto dall'inizio della prova.

Come spiegato nelle sezioni 3 e 4, R_1 e R_{10} possono differire anche di ordini di grandezza, con $R_1 < R_{10}$ a causa della corrente di polarizzazione che nei primi minuti di applicazione della tensione può essere molto elevata, fino a quando le specie polari non si sono tutte orientate e il processo di polarizzazione è concluso.

Normalmente per un buon isolante il valore di PI è > 2 , quando $PI \approx 1$, invece, la corrente di conduzione (di volume o superficiale) prevale sulla polarizzazione, indicando una forte contaminazione superficiale del campione o una perdita di isolamento significativa.

Il prototipo in prova è stato inserito in camera climatica per misurare la variazione di resistenza di isolamento al variare umidità e temperatura. Le prove sono state condotte per circa 6 mesi, da luglio a dicembre 2021.

Sono stati effettuati due protocolli di prova:

1. Temperatura costante e umidità variabile
2. Umidità costante e temperatura variabile

Per quanto riguarda il protocollo 1), la temperatura è stata fissata a 50°C e sono state fatte prove a umidità relativa 30%, 50%, 70% e 90% della durata di 2 settimane ciascuna. Le prove a temperatura variabile, invece, sono state eseguite a umidità relativa costante 50% e temperatura variabile da 20°C a 110°C con intervalli di variazione di 1 giorno ciascuno.

5.3 Test di tenuta dielettrica

Il costruttore del condensatore dichiara che il condensatore è in grado di sopportare una sovratensione di prova pari a $1.5 U_{NDC}$ per 10 s e $1.5 U_{NDC}$ per 2 s alla temperatura di 20°C, ove U_{NDC} , è la tensione nominale del condensatore in DC, cioè 900 V. Tali test sono stati ripetuti prima e dopo i cicli di invecchiamento in camera climatica per verificare la tenuta del sistema di isolamento interno dell'apparecchiatura. I test sono stati eseguiti con un generatore HVDC *Keithley 2290E-5* che fornisce una tensione variabile tra 0 e 5000 V. L'eventuale guasto durante la prova viene rivelato dall'eventuale intervento del limitatore di massima corrente del generatore.

6 Risultati Sperimentali

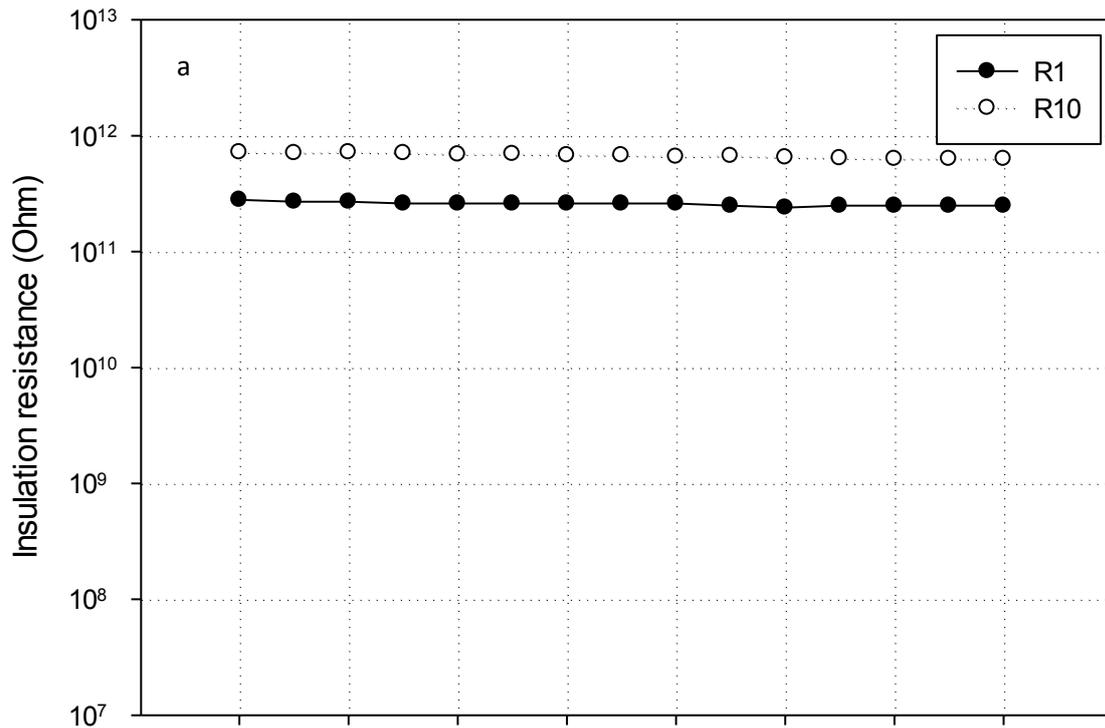
6.1 Misure della resistenza di isolamento

Nelle Figure 6.1-6.4 sono riportati i risultati delle misure di resistenza di isolamento a 1 min, R_1 e a 10 minuti, R_{10} , (A) e l'indice di polarizzazione PI (B), calcolato dall'equazione (5.2) per le prove effettuate con umidità

relativa RH=30% e 50°C di temperatura (Fig. 6.1), RH=50% e 50°C di temperatura (Fig. 6.2), RH=70% e 50°C di temperatura (Fig. 6.3), RH=90% e 50°C di temperatura (Fig. 6.4).

Commentando le prove eseguite a RH=50%, valore di umidità molto comune in ambiente, si può osservare che al passare del tempo la resistenza di isolamento cala di molti ordini di grandezza dal valore iniziale $R_{10} = 720 \text{ G}\Omega$ a $R_{10} = 26 \text{ M}\Omega$. Anche il PI diminuisce significativamente da 2.6 a circa 1.2, indice di una notevole contaminazione dell'isolamento da parte dell'umidità assorbita dall'involucro. Tuttavia, un valore di resistenza di isolamento di 26 M Ω è ancora ritenuto accettabile, visto che il valore minimo per un'apparecchiatura di bassa tensione (<1000V) è pari a 1 M Ω .

Nella figura 6.5 e 6.6 si possono confrontare i valori di resistenza di isolamento R_1 , R_{10} e PI, rispettivamente, al variare del tempo, per le prove effettuate a differenti valori di umidità relativa. Come si può osservare, in ambiente secco (RH=30%) la resistenza di isolamento non cambia apprezzabilmente durante l'intervallo di prova considerato (14 giorni). In ambienti più umidi, invece, si osserva una notevole riduzione di R_{10} : per RH=70% si ha $R_{10} = 2.7 \text{ M}\Omega$ dopo circa 10 giorni mentre per RH=90% tale valore viene raggiunto dopo soli due giorni. Si può quindi considerare che 2.7 M Ω siano il valore minimo di resistenza di isolamento che viene raggiunto quando l'involucro è completamente saturato di umidità. Analoghe osservazioni possono essere fatte per il PI (Fig. 6.6) che raggiunge valori critici solo per i livelli di umidità più elevati. Ad ogni modo il valore minimo di resistenza di isolamento misurato di 2.7 M Ω risulta comunque maggiore del valore limite di sicurezza di 1 M Ω imposto dalle norme.



2D Graph 2

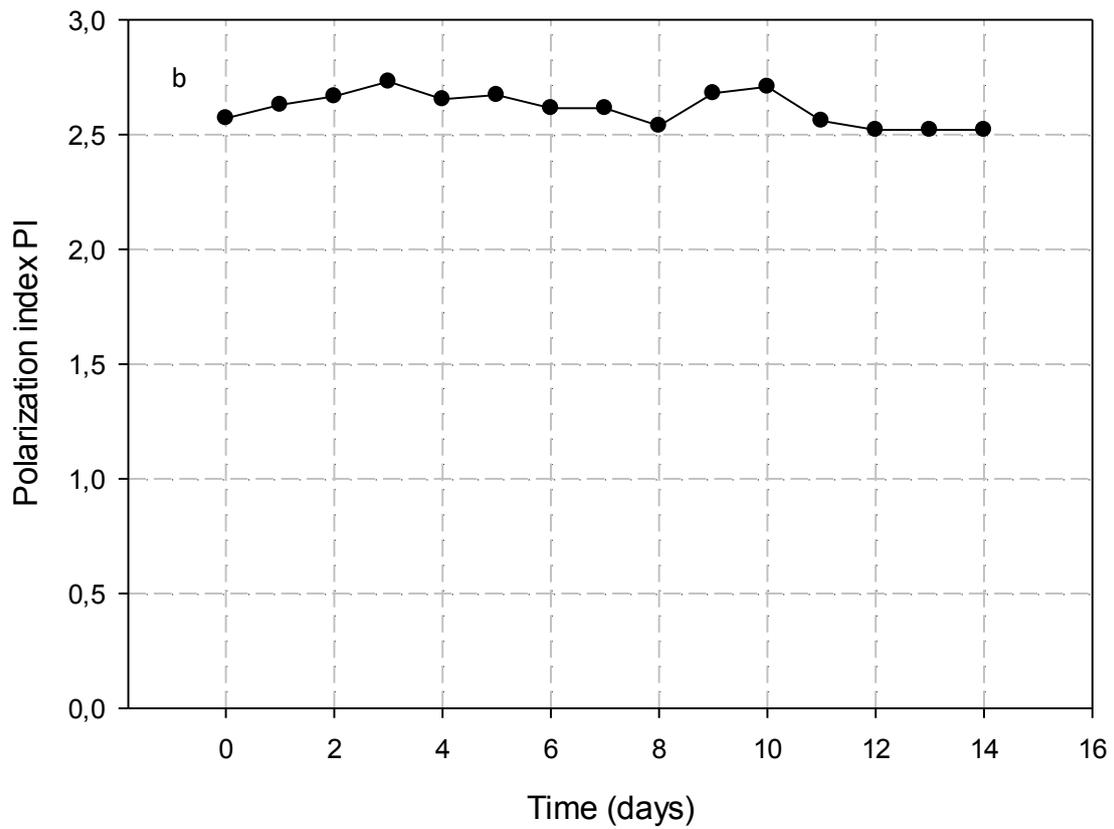


Fig. 6.1: Resistenza di isolamento a 1 min, R_1 e a 10 min, R_{10} (a) e indice di polarizzazione a RH=30% al variare del tempo di prova

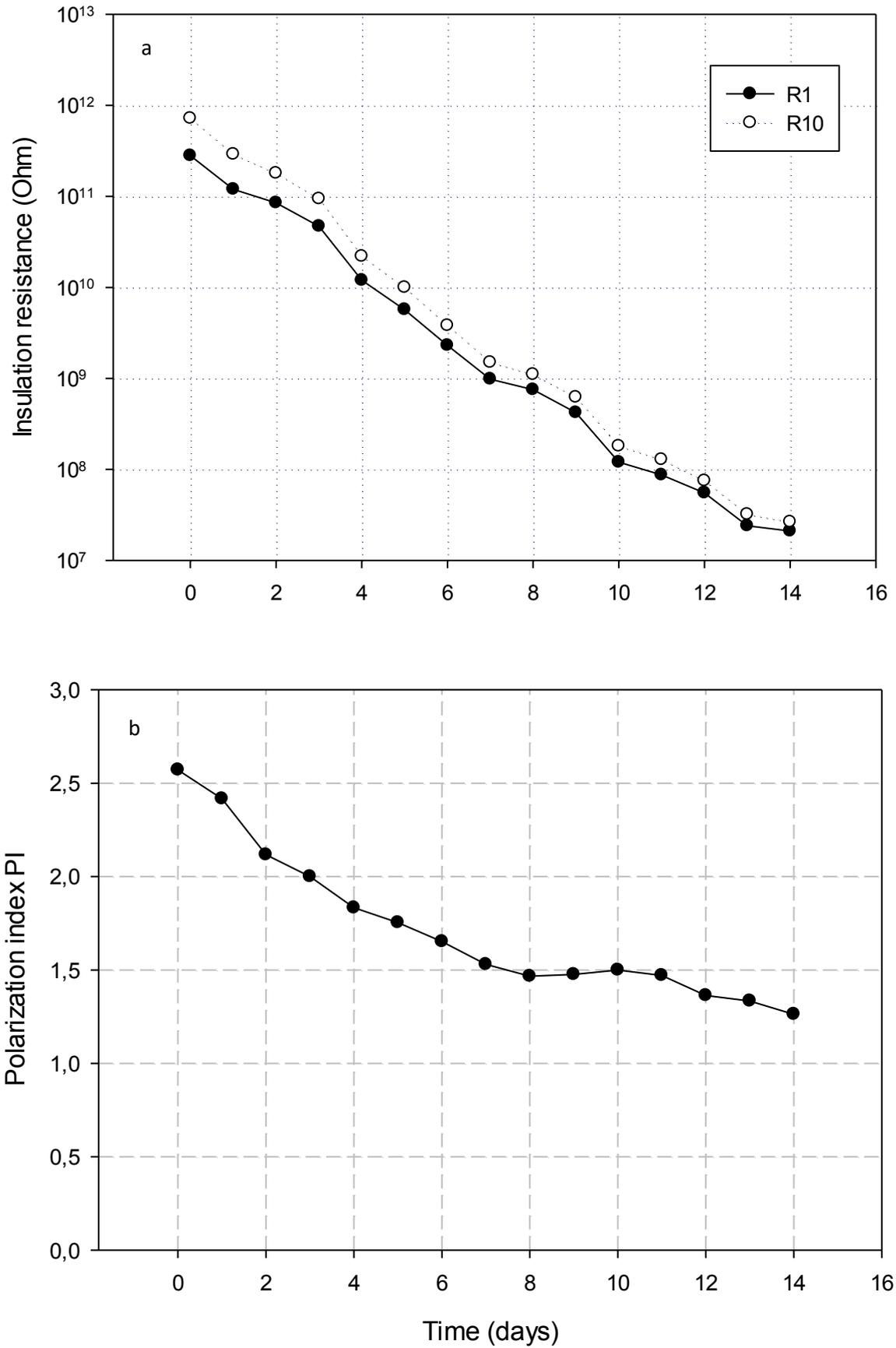


Fig. 6.2: Resistenza di isolamento a 1 min, R_1 e a 10 min, R_{10} (a) e indice di polarizzazione a RH=50% al variare del tempo di prova

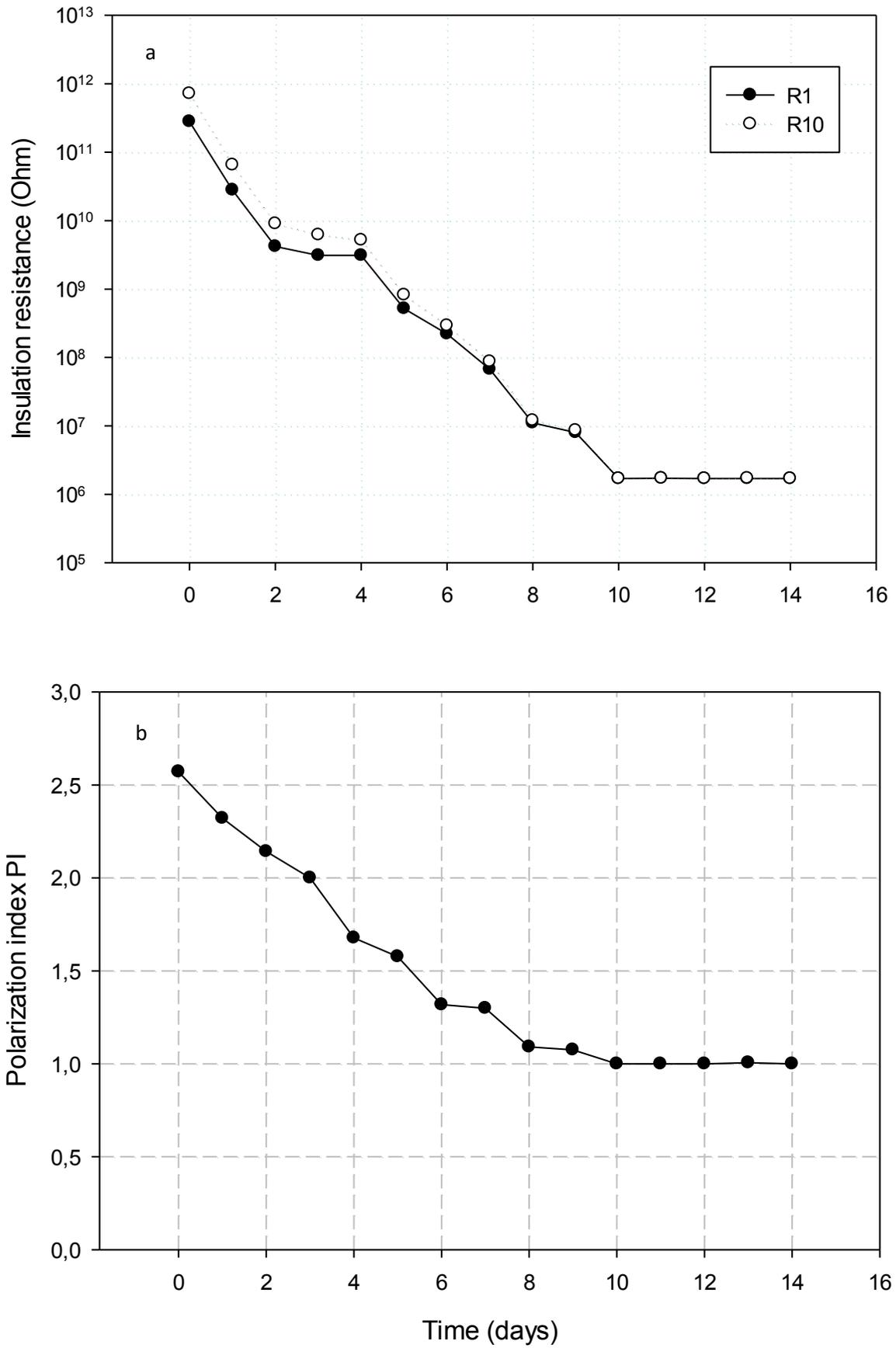


Fig. 6.3: Resistenza di isolamento a 1 min, R_1 e a 10 min, R_{10} (a) e indice di polarizzazione a RH=70% al variare del tempo di prova

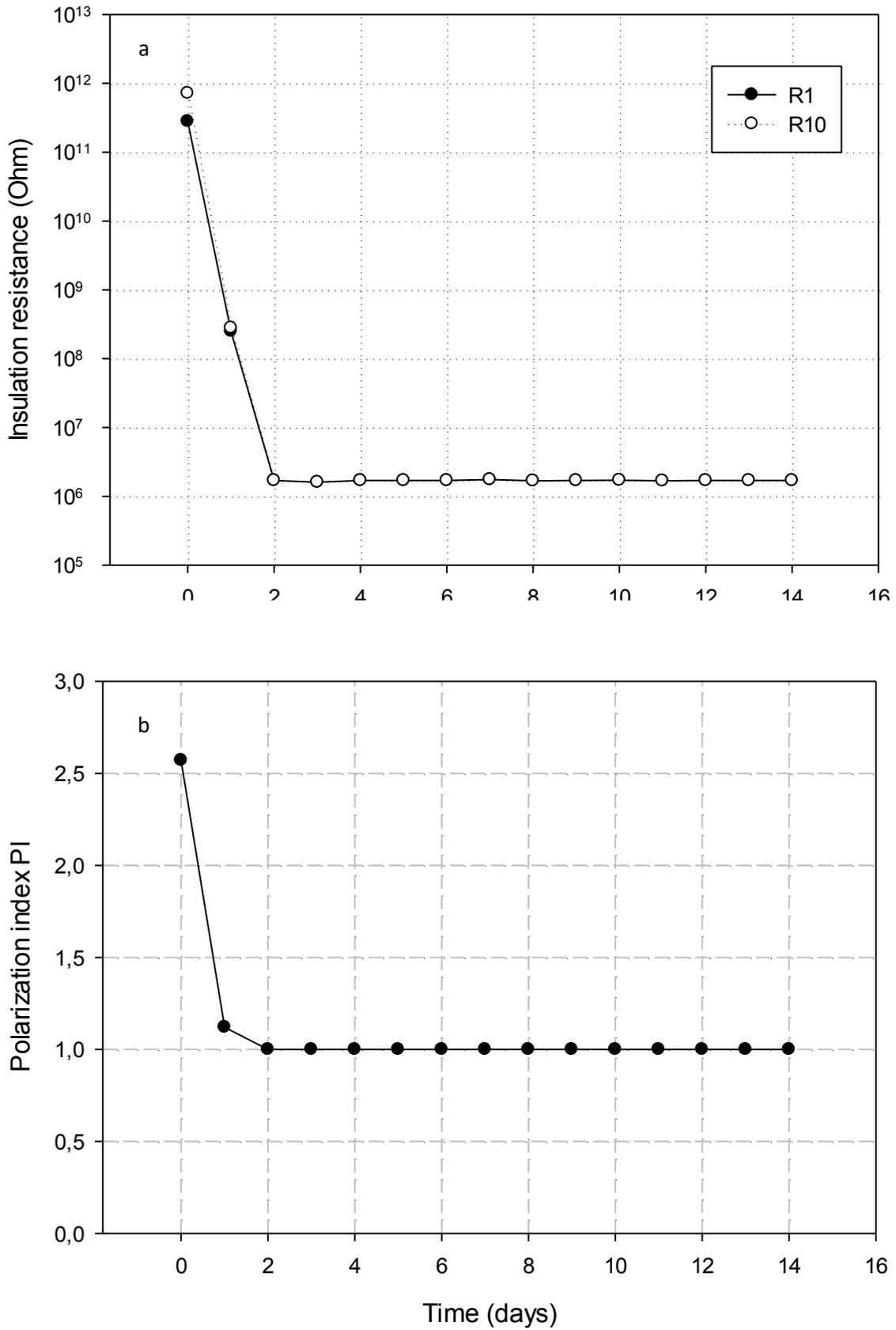


Fig. 6.4: Resistenza di isolamento a 1 min, R_1 e a 10 min, R_{10} (a) e indice di polarizzazione a RH=90% al variare del tempo di prova

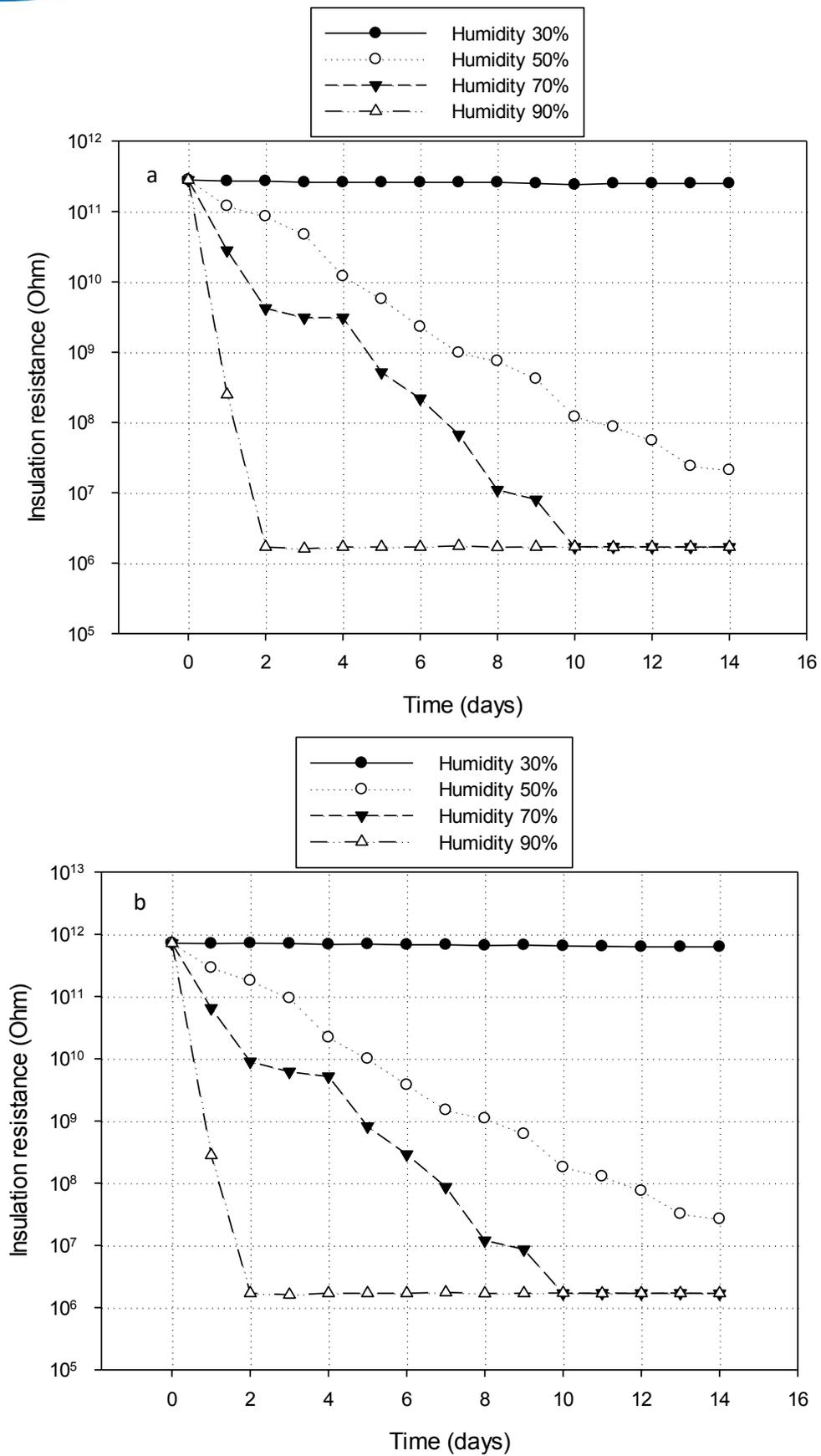


Fig. 6.5: Resistenza di isolamento R_1 (a) e R_{10} (b) per differenti valori di RH al variare del tempo di prova a 50°C.

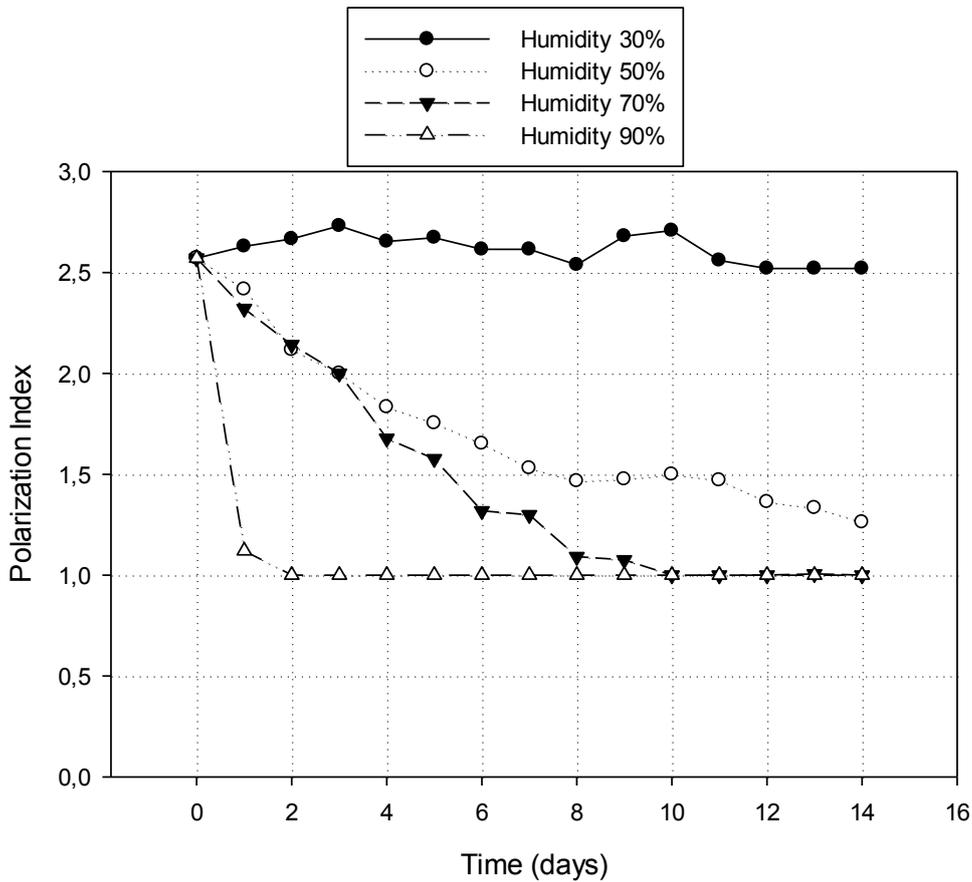
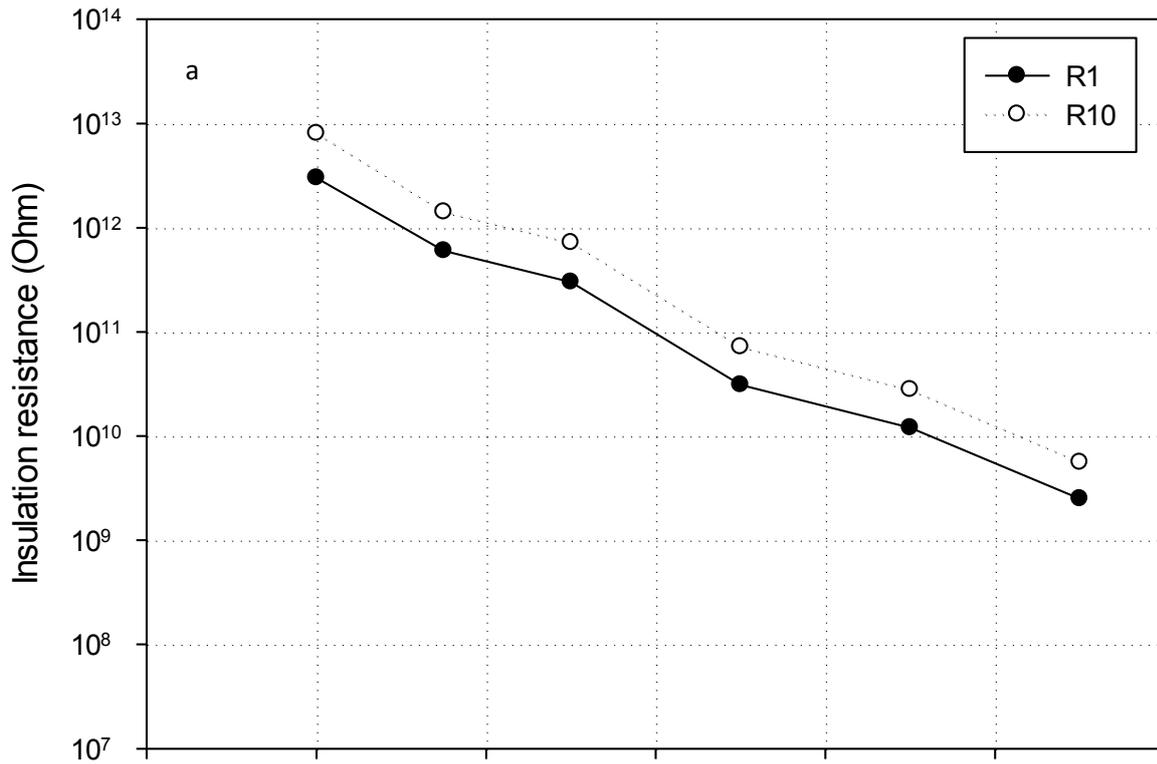


Fig. 6.6: Indice di Polarizzazione per differenti valori di RH al variare del tempo di prova a 50°C.

Al termine di ogni prova in camera climatica in umidità, il campione è stato asciugato per 48h in ambiente secco (RH=10%) ed è stata misurata di nuovo la resistenza di isolamento; in tutti i casi, i valori di resistenza di isolamento sono risultati circa uguali a quelli misurati inizialmente, segno che non vi è stata alcun peggioramento permanente delle condizioni di isolamento elettrico del prototipo.

In ultimo è stata valutata la variazione della resistenza di isolamento con la temperatura. Nella figura 6.7 sono riportati i valori di resistenza di isolamento R_1 e R_{10} e del PI al variare della temperatura di prova ad umidità fissata RH=50%. Come si può osservare, la resistenza di isolamento R_{10} cala di circa tre ordini di grandezza, da 81 T Ω a 5.7 G Ω , passando da 20°C a 110°C, mentre il PI è molto meno sensibile all'incremento di temperatura. Si osservi che il valore inferiore di resistenza risulta di gran lunga maggiore del valore limite di sicurezza di 1 M Ω .



2D Graph 2

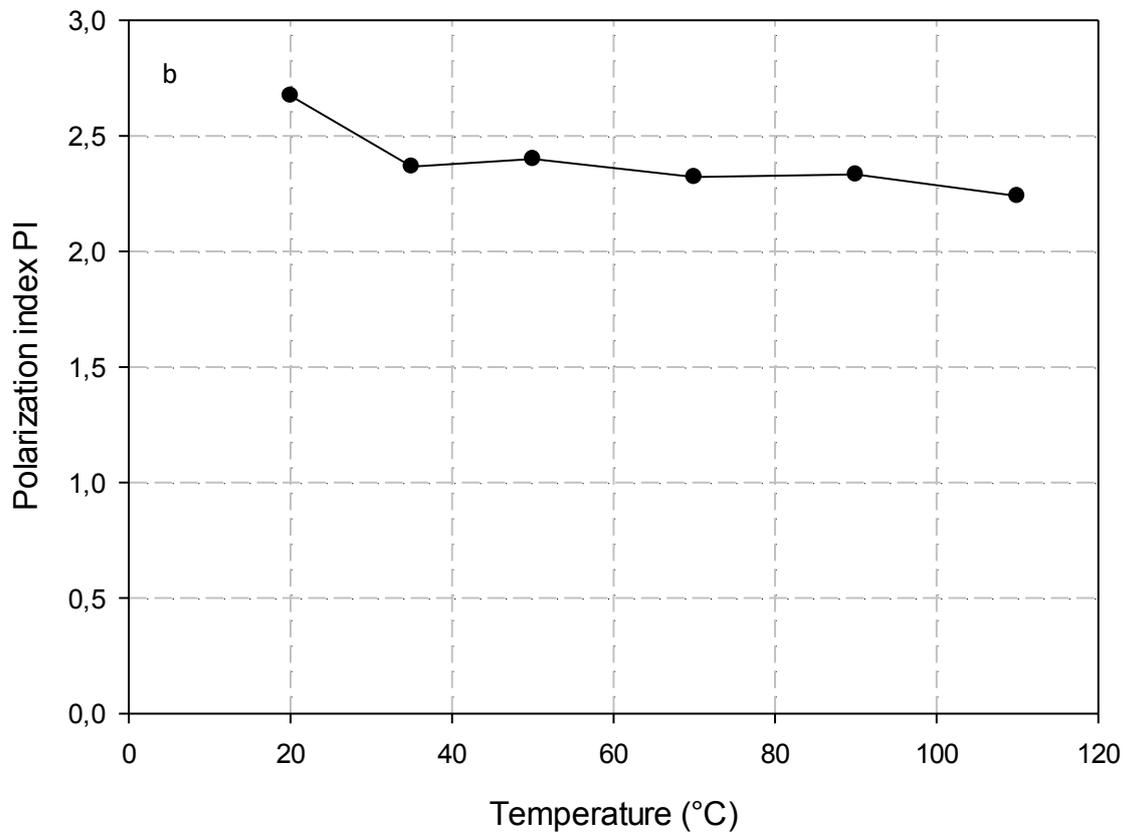


Fig. 6.7: Resistenza di isolamento (a) e PI (b) al variare della temperatura di prova a RH=50%.

6.2 Misure di capacità e tandelta

Durante i cicli di invecchiamento in camera climatica sono state misurate periodicamente capacità e tandelta del campione. I risultati sono riportati nelle figure 6.8-6.11 per le prove eseguite a RH 30%, 50%, 70% e 90% rispettivamente.

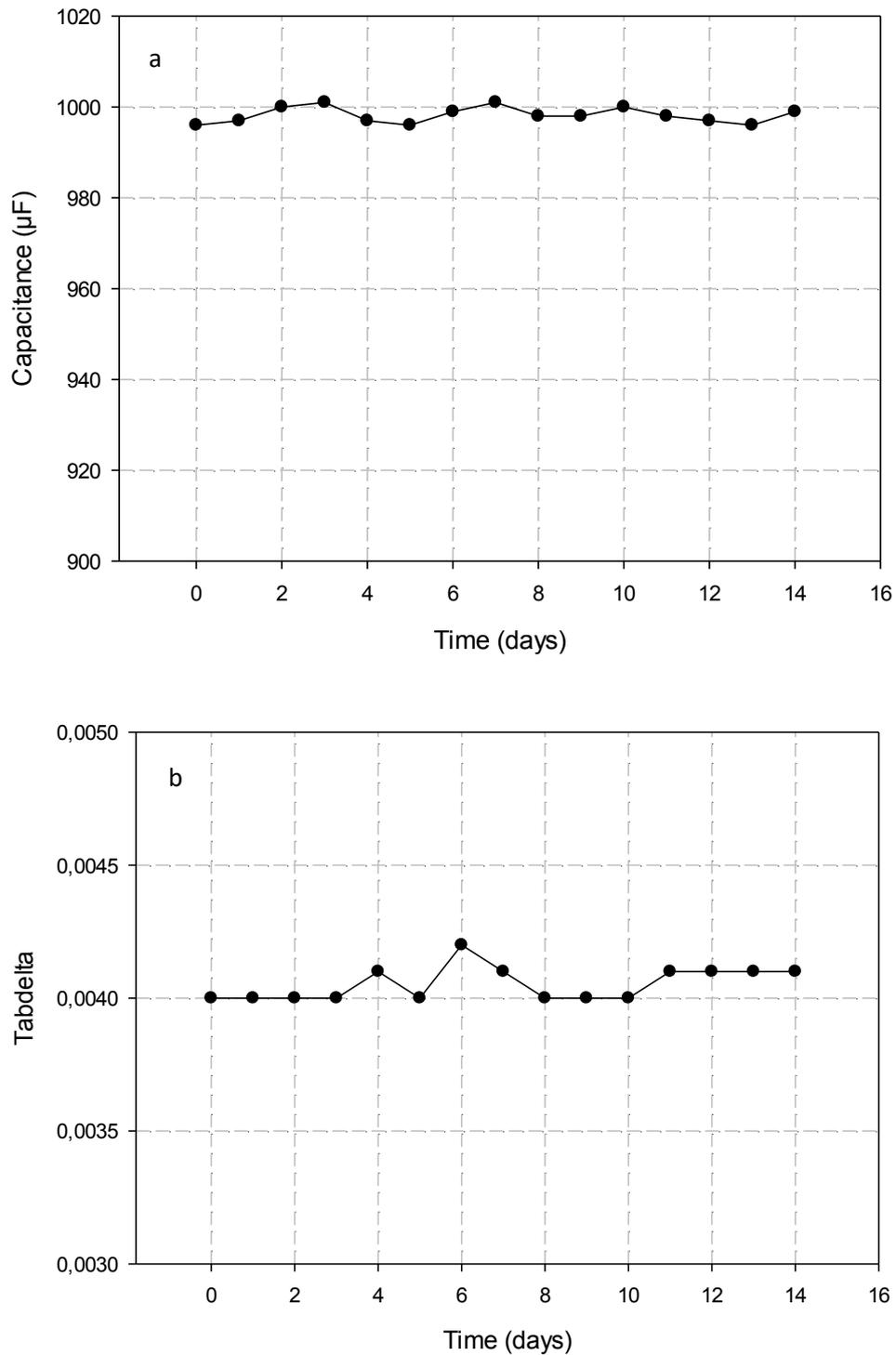


Fig. 6.8: Capacità (a) e Tandelta (b) al variare del tempo di prova a RH=30%.

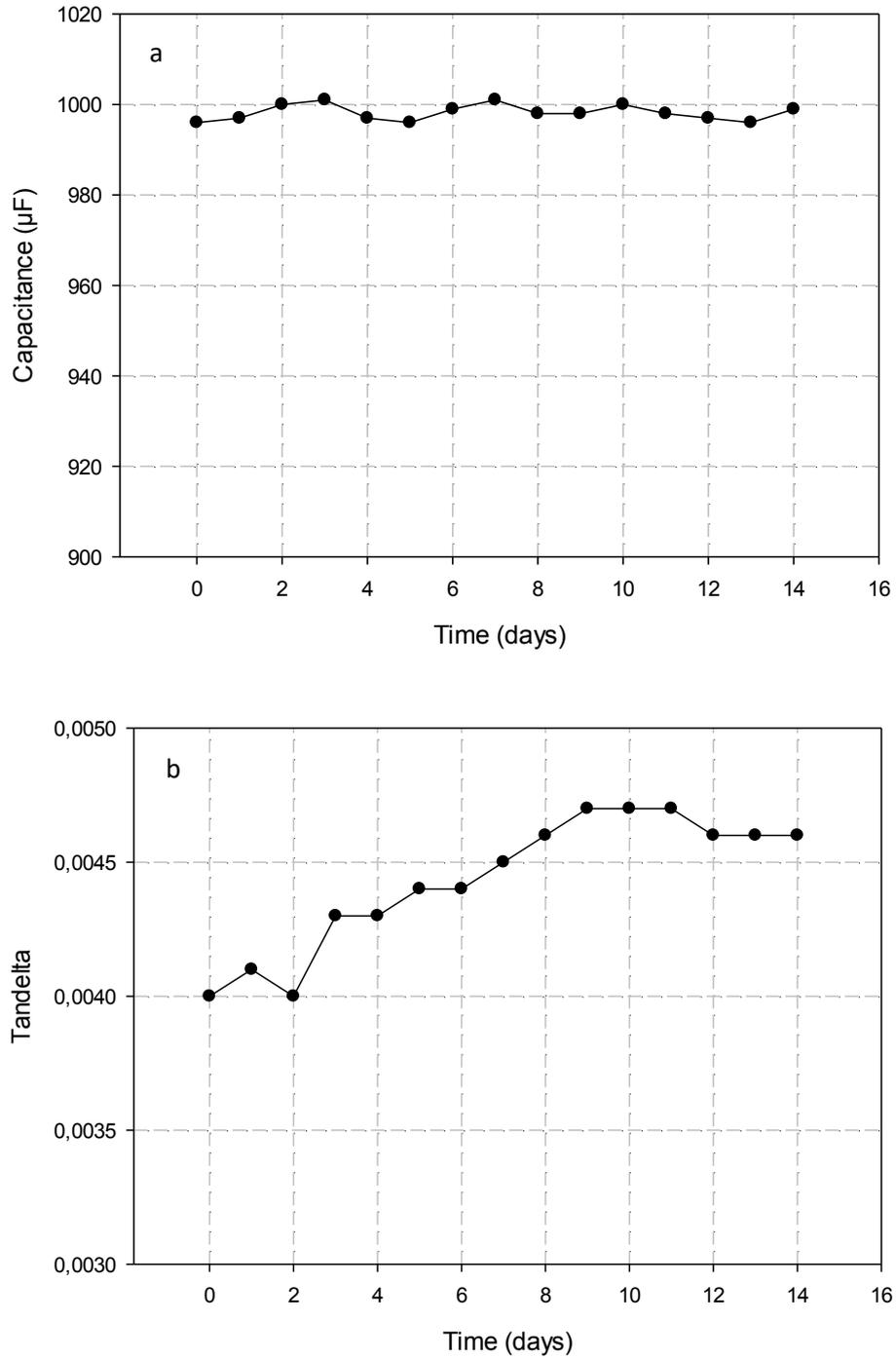


Fig. 6.9: Capacità (a) e Tandelta (b) al variare del tempo di prova a RH=50%.

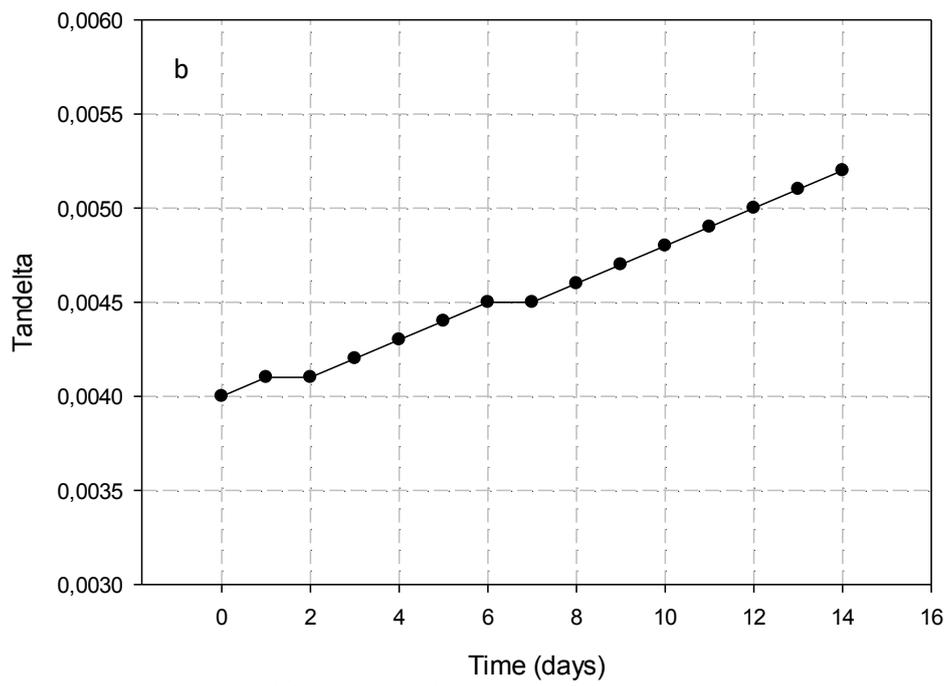
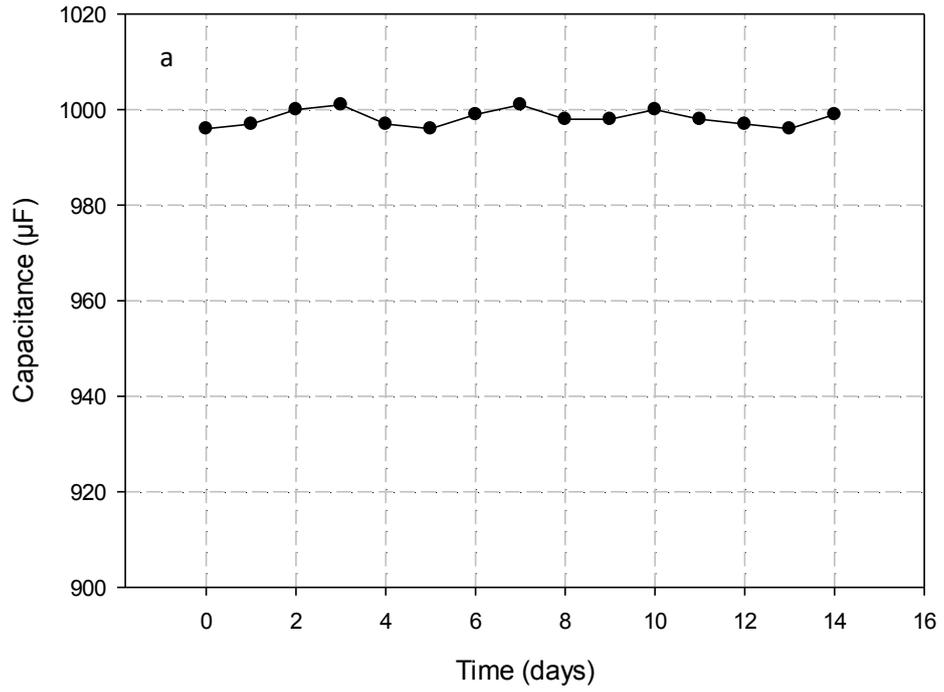


Fig. 6.10: Capacità (a) e Tandelta (b) al variare del tempo di prova a $\text{RH}=70\%$.

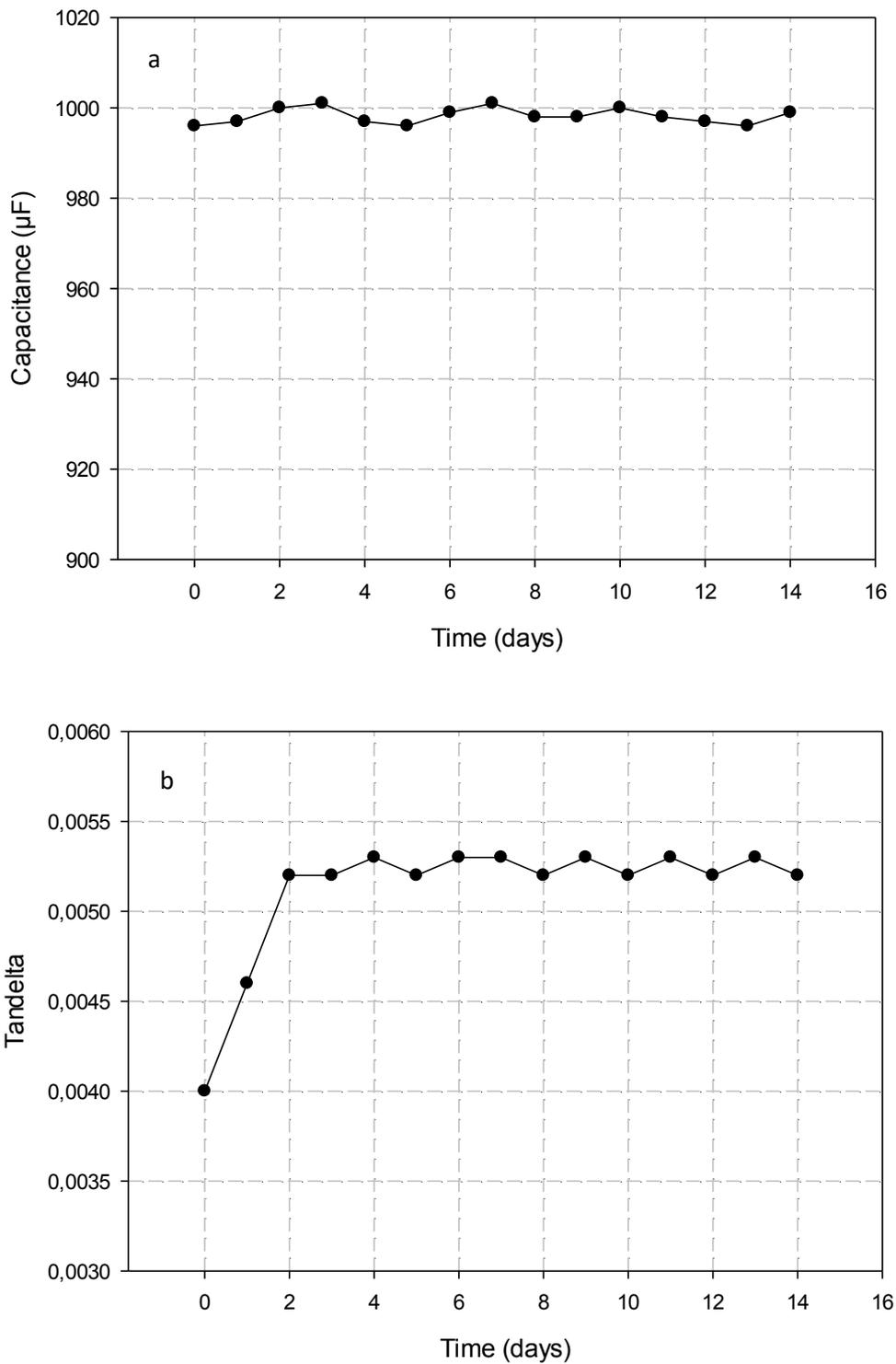


Fig. 6.11: Capacità (a) e Tandelta (b) al variare del tempo di prova a RH=90%.

Il confronto tra i valori di capacità misurati nelle varie prove e i valori di tandelta è riportato nella Fig. 6.12. Si osserva che il valore di capacità non varia significativamente durante il tempo di prova, anche nelle

condizioni di umidità più estreme, es. 90% (Fig. 6.12a). Invece, il tandelta cresce significativamente durante il periodo di prova, particolarmente per i valori di RH 70% e 90%, mentre rimane circa costante in ambiente secco. Al termine di ogni prova in camera climatica in umidità, il campione è stato asciugato per 48h in ambiente secco (RH=10%) ed è stata misurata di nuovo capacità e tandelta; in tutti i casi, i valori di resistenza misurati sono risultati circa uguali a quelli rilevati inizialmente. segno che non vi è stata alcuna modifica permanente

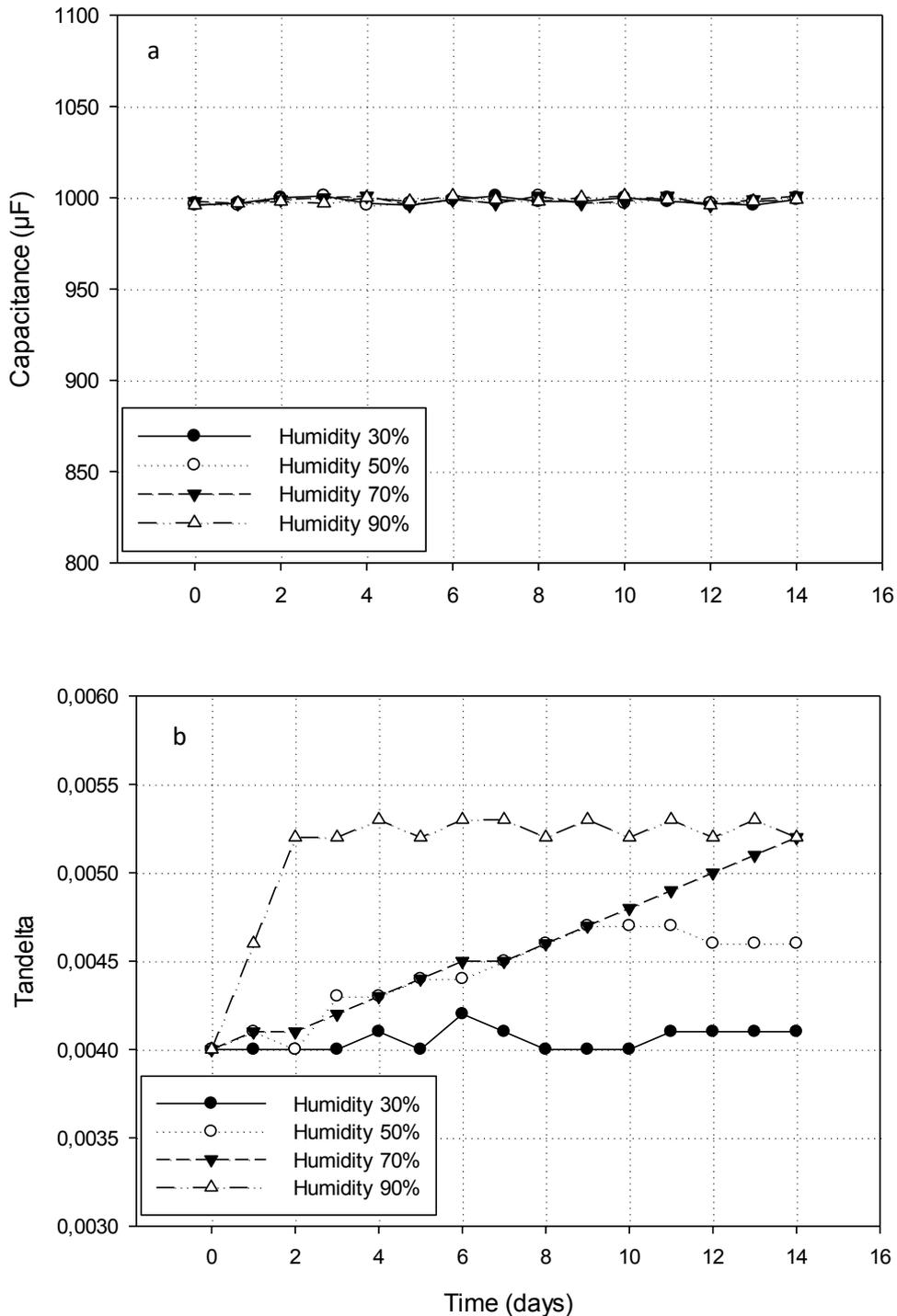


Fig. 6.12: Confronto capacità (a) e tandelta (b) al variare del tempo di prova per le RH testate.

6.3 Test di tenuta dielettrica

Le prove di tenuta dielettrica sono state eseguite sul campione al termine di ogni periodo di invecchiamento di 14 giorni in umidità. Come si può vedere dalla Tab. 6.1, tutte le prove hanno avuto esito positivo, senza guasti del campione.

Tab. 6.1: Esiti test di tenuta dielettrica

RH	Test a 1.5 U_{NDC} per 10 s	Test a 1.5 U_{NDC} per 2 s
30	OK	OK
50	OK	OK
70	OK	OK
90	OK	OK

7 Conclusioni

Dalle misure effettuate sul prototipo di tamponatura realizzato da ENEA si può concludere che l'umidità ambientale fa diminuire notevolmente la resistenza di isolamento, quasi sei ordine di grandezza in meno passando dal 30% al 90% di umidità relativa, mantenendosi comunque al di sopra del valore minimo per la sicurezza di 1 M Ω per tutto il tempo di prova. Anche la temperatura riduce la resistenza di isolamento in modo significativo, circa tre ordini di grandezza, passando da 20°C a 110°C, variazione molto inferiore a quella osservata al variare dell'umidità relativa. La capacità del condensatore non varia apprezzabilmente con l'umidità relativa mentre il $\tan\delta$ cresce di circa il 30% nelle condizioni di umidità maggiori. Al termine dei cicli di invecchiamento il campione ha passato tutti i test di tenuta, mostrando quindi che condizioni di umidità e temperatura gravose non hanno degradato significativamente il condensatore e inficiato la sicurezza elettrica.

8 Riferimenti bibliografici

1. Chavin Arnoux, "Guida alla Misura dell'Isolamento", ed. 2010.
2. IEC 61071:2017 "Capacitors for power electronics", 2017.
3. CEI EN 62631-3-1 "Proprietà dielettriche e resistive dei materiali isolanti solidi Parte 3-1: Determinazione delle proprietà resistive (metodi in c.c) - Resistenza e resistività di volume - Metodi generali"
4. CEI EN 62631-3-2 "Proprietà dielettriche e resistive dei materiali isolanti solidi Parte 3-2: Determinazione delle proprietà resistive (metodi in c.c) - Resistenza e resistività superficiali", 2016.
5. L. Simoni, "Proprietà dielettriche e Scarica dei Materiali Isolanti Elettrici", CLUEB, Bologna, 1996.

9 Abbreviazioni ed acronimi

DAR = Rapporto di Assorbimento

DD = coefficiente di scarica dielettrica

PI = Indice di Polarizzazione

PP = Polipropilene

RH = Umidità relativa

R_{10} = Resistenza misurata a 10 min

R_1 = Resistenza misurata a 1 min

10 Appendice

CURRICULUM VITAE di Davide Fabiani, Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione 'G. Marconi' dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.

POSIZIONE ACCADEMICA

- 2017 ad oggi: abilitazione scientifica nazionale al ruolo di Professore Ordinario.
- 2014 ad oggi: Professore Associato di Tecnologie Elettriche Innovative.
- 2005-2014: Ricercatore Universitario.
- 2002-2005: Assegnista di Ricerca su "Diagnostica dei Sistemi Isolanti per Alte Tensioni" presso il Dip. di Ingegneria Elettrica dell'Università di Bologna.

EDUCAZIONE

- 2001: Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università di Bologna.
- 1998: Borsa di Studio finanziata da "Pirelli Cavi e Sistemi" presso l'Università di Bologna.
- 1998: Abilitazione alla Professione di Ingegnere.
- 1997: Laurea in Ingegneria Elettrica con lode - Università di Bologna.

ATTIVITA' DIDATTICA

2007ad oggi: ha insegnato in maniera continuativa come responsabile di vari corsi di laurea e master della Facoltà di Ingegneria e Architettura. Attualmente insegna Tecnologie Elettriche Innovative M e Progettazione e Diagnostica dei Sistemi di Isolamento Elettrici M per i corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Ingegneria dell'Energia Elettrica e del corso di Elementi di Impianti Elettrici e Sicurezza T per la Laurea Magistrale in Ingegneria Civile.

ATTIVITA' DI RICERCA E PROGETTI

- Dal 2011 è Direttore Scientifico del Laboratorio di Materiali Innovativi per i Sistemi Elettrici (LIMES) del Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione dell'Università di Bologna.
- È membro fondatore del Gruppo di Ricerca sull'Elettrofilatura (RGE) dell'Università di Bologna.
- I suoi campi di ricerca riguardano principalmente:
 - Studio della diagnostica degli apparati in alta tensione, principalmente attraverso misure di scariche parziali (su cavi, trasformatori di potenza e macchine rotanti).
 - Valutazione dell'effetto delle forme d'onda non sinusoidali sull'affidabilità dei componenti e dei sistemi di isolamento (in particolare motori asincroni alimentati da convertitori elettronici di potenza).
 - Studio dei meccanismi di conduzione elettrica e del processo di invecchiamento nei sistemi di isolamento ad alta tensione, in particolare per i cavi di potenza.
 - Materiali nanostrutturati per applicazioni in apparati elettrici ed elettronici.
- Coinvolto come consulente scientifico in numerosi progetti di ricerca finanziati da enti pubblici e aziende private (Borealis, ABB, Siemens, Dow, SBM, VTT, Prysmian, Nexans, NKT) riguardanti la caratterizzazione, lo sviluppo, la modellazione e l'indagine sull'invecchiamento di materiali isolanti elettrici.
- *Principal Investigator* o *co-investigatore* di diversi 5 progetti UE, 2 PRIN, 1 FISR e 2 POR-FESR.
- Autore di 245 articoli, pubblicati sulle principali riviste internazionali o presentati a convegni internazionali.
- H-index: 33, no di citazioni: 4498

ATTIVITA' ISTITUZIONALI E INCARICHI ACCADEMICI

- 2011 ad oggi: membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca. È stato supervisore di 8 dottorandi e ha svolto il ruolo di esaminatore esterno per 11 dottorandi in Italia, Francia, Canada, Regno Unito e Finlandia.
- 2011-oggi: membro del Centro di Ricerca "Meccanica Avanzata e Materiali" dell'Università di Bologna.
- 2016-ad oggi: responsabile dello scambio Erasmus con l'Università Paul Sabatier di Tolosa (Francia).
- 2019- ad oggi: Membro residente dell'Istituto di Studi Avanzati (ISA) dell'Università di Bologna.
- 2010-2012: membro della Giunta del Dipartimento di Ingegneria Elettrica.
- 2012-2015: membro del "Collegio Superiore" dell'Università di Bologna.
- Luglio 2006: visiting professor presso il NEETRAC della Georgia Tech University.

APPARTENENZA A COMITATI TECNICI, SCIENTIFICI ED EDITORIALI

- Membro del WG IEEE su *Nanodielectrics* dell'IEEE DEIS.
- Membro del WG CIGRE D1.40 *Functional Nanomaterials for Electric Power Industry* dal 2014 al 2017.
- Segretario del WG CIGRE D1.43 *Rotating machine insulation voltage endurance under fast, repetitive voltage transients* dal 2014 al 2017.
- Segretario del WG CIGRE D1.73 *Nanostructured dielectrics: Multi-functionality at the service of the electric power industry*
- Membro del IEC TC 112 "Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems" and TC 15 "Solid electrical insulating materials"
- 2014-2015: *Technical Program Committee Chair* della conferenza IEEE CEIDP.
- Vice-chair della conferenza internazionale IEEE ICSD tenutasi a Bologna nel luglio 2013.
- Membro del Comitato Scientifico della "International Youth Conference on Energy" (IYCE) dal 2007.
- Membro dell'Editorial Board di *IET High Voltage Journal* e del *Publications Board* di IEEE DEIS
- Guest Editor della Special Issue di *Frontiers in Electronic Materials* su *Polymers for High Electric Field Applications*, 2022.
- Guest Editor della Special Issue of *Energies* su "Nuclear Cable Insulation Management", 2021
- Guest Editor della Special di *High Voltage* su "Interface Charging Phenomena for Dielectric Materials", aprile 2020.

PREMI E RICONOSCIMENTI

- 2008 - Premio per il miglior paper della *Wire International Conference*.
- 2015 - Premio per il miglior paper alla conferenza IEEE ICPADM (Sidney, Australia).
- 2020 - *High Voltage Excellent Paper Award 2020*, per il paper "*Gas-solid interface charge characterisation techniques for HVDC GIS/GIL insulators*".
- 2021 - CSEE JPES *Excellent Paper Award* per il paper "*Surface charging phenomena on HVDC spacers for compressed SF6 insulation and charge tailoring strategies*".

ALTRE ATTIVITA'

- 2016 – ad oggi: Senior Member dell'IEEE DEIS.
- 2022: Vicepresidente amministrativo della IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society (DEIS)
- 2020-2021: Vicepresidente tecnico di IEEE DEIS
- 2016-2019: membro de Consiglio di Amministrazione della IEEE DEIS e Chair del DEIS Meetings Committee.
- 1999 -2015: socio fondatore di TechImp Spa, spin-off dell'Università di Bologna.