



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea in Ingegneria Elettrotecnica

Tesi di Laurea

**TENSIONE DI SCARICA SU
CONDUTTORI CILINDRICI**

Candidato:
Giorgio Falivene

Relatore:
Ch.mo Prof. Renato Gobbo

Anno accademico 2010-2011

*Alla mia famiglia,
a Tina*

Introduzione

Studio della tenuta dielettrica tra due cilindri conduttori incrociati. Questi elettrodi consistono in due sbarre cilindriche cave, una posta a potenziale di terra mentre l'altra sottoposta alla tensione impulsiva. Tale tensione sarà un *impulso di fulminazione* le cui caratteristiche verranno menzionate in seguito; verrà utilizzata sia la polarità positiva che la negativa.

Le misure verranno fatte con gli elementi sotto osservazione a varie distanze che permettono lo studio del comportamento del dielettrico (aria) a diverse tensioni. Ciò può essere utile nelle applicazioni pratiche, per esempio nel campo dei trasformatori in resina dove il collegamento a triangolo degli avvolgimenti viene eseguito esattamente con questa tipologia di sbarre conduttrici. Solitamente tali "tubi" vengono rivestiti da uno strato di materiale termorestringente ma ciò ha maggiore funzione come protezione meccanica da urti, abrasioni ecc. che dielettrica. Infatti l'applicazione di suddetto materiale risulta difficilmente omogenea su tutta la superficie e dunque sarà impossibile parlare di miglioramento delle caratteristiche dielettriche quando esse possono variare da punto a punto. Alla luce di ciò e per ovvi motivi pratici tutte le prove che fanno capo a questo testo verranno eseguite su sbarre nude, ove l'unico dielettrico è rappresentato dall'aria.

Per questa esperienza verranno utilizzati due metodi operativi:

- Metodo dei livelli multipli;
- Metodo up-and-down.

che verranno illustrati in seguito. Saranno impiegate entrambe le metodiche per ogni distanza dei conduttori, ciò per verificare l'attendibilità e la riproducibilità dei risultati ottenuti con la prima prova (metodo dei livelli multipli).



Figura 1: Trasformatore in resina

Indice

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| Introduzione | ii |
| Elenco delle figure | vi |
| Elenco delle tabelle | viii |
| 1 Estratti normativa CEI | 1 |
| 1.1 CEI 42-1. | |
| Coefficienti di correzione caratteristiche ambientali | 1 |
| 1.2 CEI 42-4. | |
| Prove con tensioni ad impulso atmosferico | 3 |
| 1.2.1 Definizioni | 3 |
| 1.2.2 Tensione di prova | 4 |
| 1.2.3 Classificazione delle prove | 5 |
| 1.2.4 Caratteristiche statistiche delle tensioni disruptive . . | 6 |
| 2 Metodi operativi | 9 |
| 2.1 Metodo dei livelli multipli | 9 |
| 2.1.1 Analisi dei dati | 10 |
| 2.2 Metodo up-and-down | 11 |
| 2.2.1 Analisi dei dati | 12 |
| 3 Analisi dei dati sperimentali | 17 |
| 3.1 Distanza cilindri 55 mm | 19 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.1 | Metodo dei livelli multipli | 19 |
| 3.1.2 | Metodo up-and-down | 22 |
| 3.1.3 | Confronto tra i due metodi | 24 |
| 3.2 | Distanza cilindri 75 mm | 25 |
| 3.2.1 | Metodo dei livelli multipli | 26 |
| 3.2.2 | Metodo up-and-down | 28 |
| 3.2.3 | Confronto tra i due metodi | 31 |
| 3.3 | Distanza cilindri 95 mm | 32 |
| 3.3.1 | Metodo dei livelli multipli | 32 |
| 3.3.2 | Metodo up-and-down | 34 |
| 3.3.3 | Confronto tra i due metodi | 37 |
| 3.4 | Distanza cilindri 115 mm | 38 |
| 3.4.1 | Metodo dei livelli multipli | 38 |
| 3.4.2 | Metodo up-and-down | 41 |
| 3.4.3 | Confronto tra i due metodi | 44 |
| 4 | Analisi dei risultati | 47 |
| 4.1 | Curve di scarica con impulsi di tensione positivi | 48 |
| 4.2 | Curve di scarica con impulsi di tensione negativi | 49 |
| 4.3 | Curve di scarica metodo dei livelli multipli | 50 |
| 4.4 | Curve di scarica metodo up-and-down | 50 |
| | Conclusioni | 53 |
| | Bibliografia | 57 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Trasformatore in resina | ii |
| 1.1 | Coefficiente di correzione | 2 |
| 1.2 | Impulso di fulminazione | 3 |
| 2.1 | $U=f(P)$ | 11 |
| 2.2 | Rappresentazione di $G=f(\frac{d}{\sigma})$ e di $H=f(\frac{d}{\sigma})$ | 14 |
| 3.1 | Schema disposizione conduttori e loro dimensioni in [mm] | 18 |
| 3.2 | Grafico $p=f(U_p)$ D=55 mm polarità positiva | 20 |
| 3.3 | Grafico $p=f(U_p)$ polarità negativa | 21 |
| 3.4 | Tabella up-and-down D=55 mm polarità positiva | 22 |
| 3.5 | Tabella media tensioni di prova D=55 mm polarità positiva | 23 |
| 3.6 | Tabella up-and-down D=55 mm polarità negativa | 24 |
| 3.7 | Tabella media tensioni di prova D=55 mm polarità negativa | 25 |
| 3.8 | Grafico $p=f(U_p)$ D=75 mm polarità positiva | 27 |
| 3.9 | Grafico $p=f(U_p)$ D=75 mm polarità negativa | 28 |
| 3.10 | Tabella up-and-down D=75 mm polarità positiva | 28 |
| 3.11 | Tabella media tensioni di prova D=75 mm polarità positiva | 29 |
| 3.12 | Tabella up-and-down D=75 mm polarità negativa | 30 |
| 3.13 | Tabella media tensioni di prova D=75 mm polarità negativa | 31 |
| 3.14 | Grafico $p=f(U_p)$ D=95 mm polarità positiva | 33 |
| 3.15 | Grafico $p=f(U_p)$ D=95 mm polarità negativa | 34 |
| 3.16 | Tabella up-and-down D=95 mm polarità positiva | 35 |

| | | |
|------|-------------------------------------------------------------|----|
| 3.17 | Tabella media tensioni di prova D=95 mm polarità positiva . | 36 |
| 3.18 | Tabella up-and-down D=95 mm polarità negativa | 36 |
| 3.19 | Tabella media tensioni di prova D=95 mm polarità negativa | 37 |
| 3.20 | Grafico $p=f(U_p)$ D=115 mm polarità positiva | 39 |
| 3.21 | Grafico $p=f(U_p)$ D=115 mm polarità negativa | 40 |
| 3.22 | Tabella up-and-down D=115 mm polarità positiva | 41 |
| 3.23 | Tabella media tensioni di prova D=115 mm polarità positiva | 42 |
| 3.24 | Tabella up-and-down D=115 mm polarità negativa | 42 |
| 3.25 | Tabella media tensioni di prova D=115 mm polarità negativa | 44 |
| 4.1 | Grafico $V=f(D)$ generale | 47 |
| 4.2 | Grafico $V=f(D)$ impulso positivo | 48 |
| 4.3 | Grafico $V=f(D)$ impulso negativo | 49 |
| 4.4 | Grafico $V=f(D)$ livelli multipli | 50 |
| 4.5 | Grafico $V=f(D)$ livelli up-and-down | 51 |
| 4.6 | Tabella riassuntiva U_{50} | 54 |
| 4.7 | Grafico $V=f(D)$ riassuntivo polarità positiva | 55 |
| 4.8 | Grafico $V=f(D)$ riassuntivo polarità negativa | 55 |
| 4.9 | Grafico $V=f(D)$ riassuntivo | 56 |

Elenco delle tabelle

| | | |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Tabella coefficiente di correzione | 2 |
| 3.1 | Condizioni ambientali D=55 mm | 19 |
| 3.2 | Risultati prove di classe 1 D=55 mm polarità positiva | 20 |
| 3.3 | Risultati prove di classe 1 D=55 mm polarità negativa | 21 |
| 3.4 | Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=55 mm polarità positiva | 22 |
| 3.5 | Valori calcolati prova di classe 2 D=55 mm polarità positiva | 23 |
| 3.6 | Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=55 mm polarità negativa | 24 |
| 3.7 | Valori calcolati prova di classe 2 D=55 mm polarità negativa | 24 |
| 3.8 | Condizioni ambientali D=75 mm | 26 |
| 3.9 | Risultati prove di classe 1 D=75 mm polarità positiva | 26 |
| 3.10 | Risultati prova di classe 1 D=75 mm polarità negativa | 27 |
| 3.11 | Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=75 mm polarità positiva | 29 |
| 3.12 | Valori calcolati prova di classe 2 D=75 mm polarità positiva | 29 |
| 3.13 | Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=75 mm polarità negativa | 30 |
| 3.14 | Valori calcolati prova di classe 2 D=75 mm polarità negativa | 30 |
| 3.15 | Condizioni ambientali D=95 mm | 32 |
| 3.16 | Risultati prova di classe 1 D=95 mm polarità positiva | 32 |
| 3.17 | Risultati prova di classe 1 D=95 mm polarità negativa | 34 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.18 Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=95 mm polarità positiva | 35 |
| 3.19 Valori calcolati prova di classe 2 D=95 mm polarità positiva | 35 |
| 3.20 Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=95 mm polarità negativa | 36 |
| 3.21 Valori calcolati prova di classe 2 D=95 mm polarità negativa | 37 |
| 3.22 Condizioni ambientali D=115 mm | 38 |
| 3.23 Risultati prova di classe 1 D=115 mm polarità positiva . . . | 39 |
| 3.24 Risultati prova di classe 1 D=55 mm polarità negativa . . . | 40 |
| 3.25 Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=115 mm polarità positiva | 41 |
| 3.26 Valori calcolati prova di classe 2 D=115mm polarità positiva | 42 |
| 3.27 Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=115 mm polarità negativa | 43 |
| 3.28 Valori calcolati prova di classe 2 D=115 mm polarità negativa | 43 |

Capitolo 1

Estratti normativa CEI

1.1 CEI 42-1.

Coefficienti di correzione caratteristiche ambientali

La normativa consiglia di normalizzare tutte le prove sulla rigidità dielettrica a condizioni ambientali standard per rendere la prova riproducibile e confrontabile con misurazioni fatte in condizioni ineguali. E' fissata una temperatura di 20°C ad una pressione di 1013 millibar (760 mm di mercurio). Perciò per ottenere la tensione di scarica V_n alle date condizioni partendo dalla generica temperatura t ed dalla pressione H si utilizzerà la seguente formula:

$$V_n = \frac{V}{k} \quad (1.1)$$

dove k è il coefficiente di correzione, funzione della densità relativa dell'aria alla temperatura t ed alla pressione H . La densità relativa dell'aria d si calcola dalla relazione:

$$d = 0,289 \frac{H}{273 + t} \quad H \text{ in millibar; } t \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (1.2)$$

oppure

$$d = 0,386 \frac{H}{273 + t} \quad H \text{ in mm Hg; } t \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (1.3)$$

Il coefficiente di correzione k è dato dalla tabella seguente:

| | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| d | 0,70 | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 |
| k | 0,72 | 0,77 | 0,82 | 0,86 | 0,91 | 0,95 | 1,00 | 1,05 | 1,09 | 1,13 |

Tabella 1.1: Tabella coefficiente di correzione

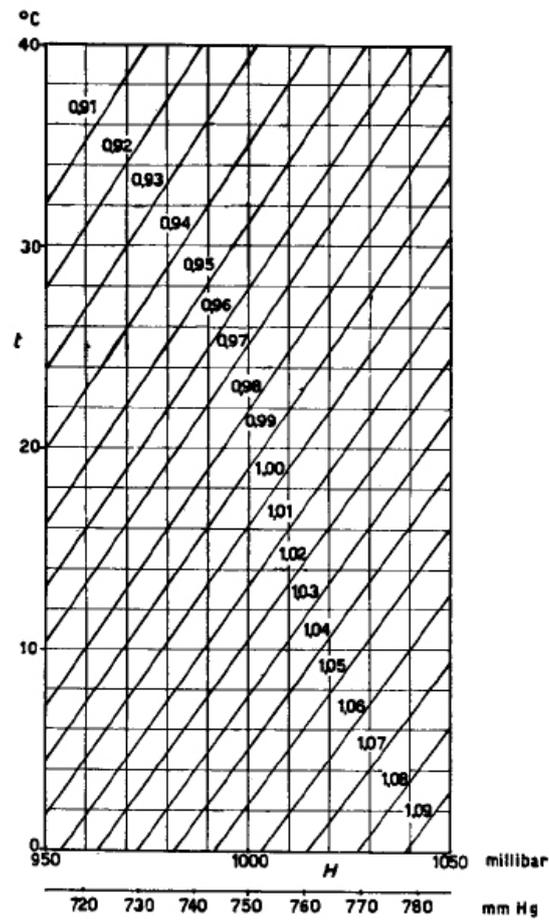


Figura 1.1: Coefficiente di correzione

1.2 CEI 42-4.

Prove con tensioni ad impulso atmosferico

1.2.1 Definizioni

Impulso atmosferico

Un impulso è un transitorio aperiodico di tensione o di corrente, che solitamente sale rapidamente fino ad un valore massimo e quindi decresce rapidamente fino a zero. In particolare si ha un impulso di fulminazione quando il suo fronte ha una durata inferiore ai $20 \mu\text{s}$.

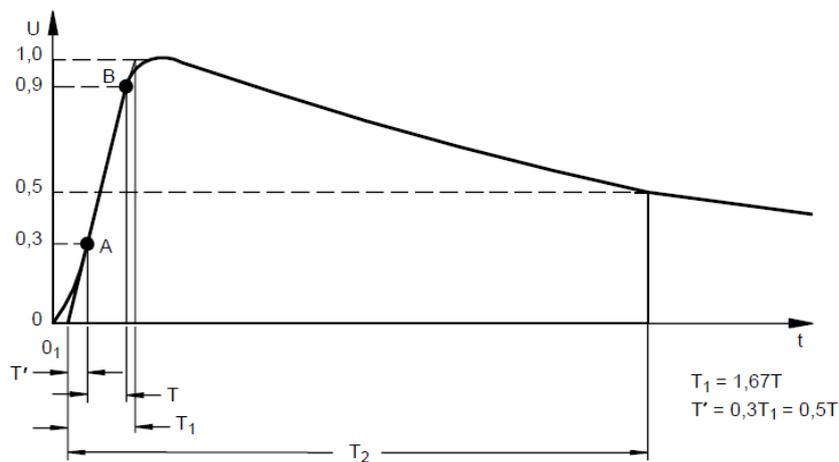


Figura 1.2: Impulso di fulminazione

Impulso atmosferico pieno

Un impulso atmosferico pieno è un impulso di fulminazione che non è troncato da una scarica disruptiva.

Impulso atmosferico tronco

Un impulso atmosferico tronco è un impulso di fulminazione durante il quale una scarica disruptiva causa un brusco crollo. La troncatura può avvenire sul fronte, sulla cresta o sulla coda.

Valore della tensione di prova

Si adotta come valore della tensione di prova il valore di cresta presunto.

Tempo all'emivalore T_2

Il tempo all'emivalore T_2 è un parametro virtuale definito come l'intervallo di tempo tra l'origine virtuale O_1 e l'istante in cui la tensione sia scesa a metà del valore di cresta.

Durata del fronte T_1

La durata del fronte T_1 di un impulso atmosferico è un parametro virtuale definito come 1,67 volte l'intervallo di tempo T tra gli istanti in cui la tensione assume valori pari al 30 e al 90% del valore di cresta (punti A e B figura 1.2).

Tempo alla troncatura T_c

Il tempo alla troncatura T_c è un parametro virtuale definito come l'intervallo di tempo tra l'origine virtuale O_1 e l'istante di troncatura.

1.2.2 Tensione di prova

Impulso atmosferico normalizzato

L'impulso atmosferico normalizzato è un impulso pieno avente una durata del fronte di T_p di $1,2 \mu\text{s}$ ed un tempo all'emivalore T_2 di $50 \mu\text{s}$. Si trova indicato come *Impulso 1,2/50*.

Tolleranze

Si accettano le seguenti differenze tra i valori specificati e quelli effettivi:

- Valore di cresta $\pm 3\%$
- Tempo alla cresta $\pm 20\%$
- Tempo all'emivalore $\pm 60\%$

Generazione della tensione di prova

L'impulso è prodotto solitamente con un generatore che consiste essenzialmente in un certo numero di condensatori che vengono caricati in parallelo da un generatore di tensione continua e successivamente scaricati in serie in un circuito che comprende l'oggetto in prova.

1.2.3 Classificazione delle prove

Le procedure di prova relative a scariche disruptive possono essere divise in tre classi dal punto di vista della valutazione statistica.

Classe 1: Prove a livelli multipli

In una prova di classe 1, si applicano n sollecitazioni di tensione sostanzialmente uguali per ognuno degli m livelli di tensione U_i ($i=1,2,\dots,m$). Questa procedura è impiegata sostanzialmente per prove con tensioni impulsive, ma anche alcune prove con tensioni alternate e continue ricadono in questa classe.

I risultati di prova sono gli m numeri n_i delle applicazioni della tensione e i corrispondenti numeri d_i delle scariche disruptive per ognuno dei livelli di tensione U_i .

Classe 2: Prove up-and-down

In una prova di classe 2, si applicano m gruppi di n sollecitazioni di ampiezza sostanzialmente uguale ai livelli di tensione U_i . Il livello di tensione per ogni successivo gruppo di sollecitazioni è aumentato o diminuito di una piccola quantità ΔU , a seconda del risultato della prova precedente.

Classe 3: Prove di scariche successive

In una prova di classe 3 si applica per m volte una procedura che porta alla scarica dell'oggetto in prova. La tensione di prova può essere aumentata con continuità fino a provocare una scarica oppure mantenuta costante fino ad ottenere una scarica disruptiva. I risultati sono gli m valori di tensione U_i o di tempo t_i per i quali si è verificata la scarica disruptiva. Queste prove sono effettuate con tensioni continue, alternate o impulsive. Ricadono in questa categoria quelle prove con tensioni impulsive in cui la scarica avviene sul fronte.

1.2.4 Caratteristiche statistiche delle tensioni disruptive

Le tensioni di scarica disruptiva sono soggette a variazioni casuali e di conseguenza si deve effettuare un certo numero di osservazioni per ottenere un valore di tensione che sia significativo dal punto di vista statistico. Le procedure di prova prima descritte sono basate generalmente su considerazioni statistiche.

Probabilità di scarica p di un oggetto in prova

La probabilità di scarica p di un oggetto in prova è la probabilità che l'applicazione di una tensione con una data forma d'onda ed un determinato valore presunto dia luogo a una scarica disruptiva dell'oggetto in prova. Il parametro può essere espresso in percentuale o in forma di frazione.

Probabilità di tenuta q di un oggetto in prova

La probabilità di tenuta q di un oggetto in prova è la probabilità che l'applicazione di una tensione con una data forma d'onda ed un determinato valore presunto non dia luogo a una scarica disruptiva dell'oggetto in prova. Se la probabilità di scarica è p , la probabilità di tenuta q è data da $(1-p)$.

Tensione di scarica 50% (U_{50}) di un oggetto in prova

La tensione di scarica disruptiva 50% è il valore di tensione presunto che ha il 50% di probabilità di produrre la scarica disruptiva dell'oggetto in prova.

Tensione di scarica $p\%$ (U_p) di un oggetto in prova

La tensione di scarica disruptiva $p\%$ è il valore di tensione presunto che ha il $p\%$ di probabilità di produrre la scarica disruptiva dell'oggetto in prova.

Deviazione standard s della tensione di scarica di un oggetto in prova

La deviazione convenzionale s della tensione di scarica di un oggetto in prova è la differenza tra i valori delle tensioni di scarica con probabilità 50% e 16%. Spesso è espressa in valore relativo, con riferimento alla tensione di scarica 50%.

Capitolo 2

Metodi operativi

Approfondimento sui metodi operativi utilizzati:

- Metodo dei livelli multipli;
- Metodo up-and-down.

Questi criteri sono utili per la determinazione di un evento casuale tramite numerose misure, come nel caso della tenuta dielettrica.

2.1 Metodo dei livelli multipli

Questo metodo consiste nell'applicare n_i impulsi di tensione dello stesso valore all'oggetto in prova per m livelli di tensione U_i ($i=1,2,\dots,m$) e nel registrare il numero risultante d_i ($\leq n_i$) delle scariche disruptive. Per ogni livello U_i la probabilità di scarica P_j è stimata pari alla frequenza di scarica $f_i=d_i/n_i$.

I parametri di questa prova devono essere accuratamente scelti: il numero di livelli di tensione presi in considerazione deve essere almeno di cinque gradini (o più), e la variazione di tensione ΔU per ognuno di essi deve essere compresa tra $0,3 \div 0,6 U_{50}$; inoltre, per ogni livello, devono essere eseguite minimo dieci prove (o più) in base alla precisione voluta. Tra una prova e la successiva è consigliato attendere una quantità di tempo tale da permettere

al dielettrico il totale ripristino delle capacità isolanti. La ricombinazione ionica completa è importante per rendere le prove indipendenti.

2.1.1 Analisi dei dati

In questo caso, la frequenza della scarica $f_i=d_i/n_i$ ad un livello di tensione U_i è inteso come la stima di $p(U_i)$, la probabilità di scarica disruptiva al livello di tensione U_i . Le m stime di $p(U_i)$ ottenute con questo metodo, possono quindi essere interpolate facendo riferimento ad una funzione di distribuzione di probabilità $p(U)$ (figura 2.1) per determinare i parametri U_{50} e $s=U_{50}-U_{16}$. Con U_{16} è indicato il valore di tensione presunto che ha il 16% di probabilità di produrre la scarica disruptiva.

Come regola generale, l'errore statistico tende a variare in ragione inversa con la radice quadrata del numero n_i di impulsi applicati per ogni livello di tensione U_i ed inversamente con il numero m di livelli di tensione.

In questo caso, applicando 10 impulsi di tensione ($n_i=10$) ad ognuno di 5 livelli $m=5$, i limiti di confidenza al 95% sarebbero

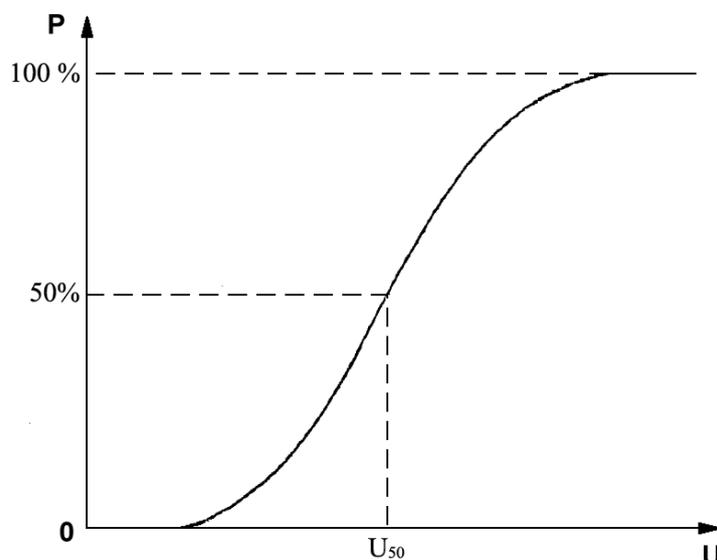
Per U_{50} :

$$(U_{50}^* - 0,75s^*) \leq U_{50} \leq (U_{50}^* + 0,75s^*) \quad (2.1)$$

e per s :

$$(0,4s^*) \leq s \leq (2,0s^*) \quad (2.2)$$

dove U_{50}^* e s^* sono le stime di U_{50} e s ottenute interpolando i risultati sperimentali con una funzione di distribuzione della probabilità di scarica $p(U)$. In aggiunta, l'errore statistico tende a valori più bassi per stime di U_p in prossimità di $p=0,5$ o 50%

Figura 2.1: $U=f(P)$

2.2 Metodo up-and-down

Questo metodo si concentra immediatamente vicino a U_{50} e ciò permette la riduzione delle prove di circa il 30÷40% rispetto al metodo del paragrafo 2.1, inoltre l'elaborazione dei dati risulta semplice e non tediosa. Operativamente si applicano m gruppi di n sollecitazioni di ampiezza sostanzialmente uguale ai livelli di tensione U_i . Il livello di tensione per ogni successivo gruppo di sollecitazioni è aumentato o diminuito di una piccola quantità ΔU , a seconda del risultato della prova precedente.

Sono impiegate comunemente due procedure di prova: la procedura di tenuta mira a determinare i livelli di tensione che corrispondono a probabilità di scarica basse, e la procedura di scarica che trova i livelli di tensione corrispondenti a probabilità di scarica elevate. Nella procedura di tenuta, il livello di tensione è incrementato di una quantità ΔU se non si verificano scariche disruptive in un gruppo di n impulsi, altrimenti il livello di tensione è diminuito della stessa quantità.

Quando $n=1$, le due procedure di prova divengono identiche e corrispon-

dono al metodo up-and-down per la determinazione della tensione di scarica al 50%. I risultati della prova sono i numeri k_i dei gruppi di sollecitazioni applicati ai livelli di tensione U_i . Il primo livello U_i che si considera è quello a cui sono stati applicati almeno due gruppi di sollecitazioni. Il numero totale di gruppi utili è $m = \sum k_i$.

2.2.1 Analisi dei dati

Consideriamo che U_{50} sia compresa in un tratto di curva lineare nel grafico $p=f(U)$. Allora possiamo definire h come il livello di tensione adottato (ad ogni livello di tensione h corrisponde una tensione in [V]) e W come il rapporto h_i/U_i ottenuto dai dati elaborati durante le prove con h_i e U_i presi casualmente nell'intervallo di escursione considerato lineare (semplice proporzione $U_i:h_i=U_{50}:h$). Avremo quindi:

$$h = W U_{50} \quad (2.3)$$

Possiamo chiamare h tensione normalizzata e rappresentare il suo valore al 50% e la varianza come μ e σ^2 . L'esperimento inizia scegliendo un livello di tensione iniziale h_0 . I restanti gradini saranno dedotti da tale valore incrementandolo o decrementandolo di un valore fisso che nel nostro caso sarà 0,1 divisioni (successivamente divisioni sarà abbreviato *div*) imposto dallo strumento di regolazione della tensione impulsiva. Variare la *div* vorrà dire cambiare la tensione di scarica voluta. Con questo metodo il numero totale dei successi (scarica del dielettrico) sarà circa uguale al numero dei fallimenti. Infatti il numero di fallimenti per ogni livello potrà differire al massimo di uno dal numero dei successi e viceversa. Per stimare μ e σ^2 utilizzeranno la somma dei successi se appaiono con minor frequenza o in caso contrario gli insuccessi. Definiamo N come la più piccola somma precedentemente descritta e definiamo $n_0, n_1, n_2...n_k$ come la frequenza di apparizione di quel gradino di tensione dove n_0 corrisponde al livello di tensione più basso mentre n_k a quello più alto. Avremo $\sum n_i = N$.

La stima dei valori desiderati μ e σ^2 è basata sul calcolo di due momenti:

$$A = \Sigma in_i \quad (2.4)$$

$$B = \Sigma i^2 n_i \quad (2.5)$$

successivamente con la seguente equazione si ricava μ :

$$\mu = h' + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2.6)$$

dove h' è la tensione normalizzata corrispondente al livello di tensione minore. Si utilizzerà il segno *positivo* quando l'analisi sarà basata sugli insuccessi altrimenti il segno *negativo*.

La deviazione standard σ sarà data da:

$$\sigma = 1,620 d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,29 \right) \quad (2.7)$$

Da notare che $NB - A^2 / N^2$ è una stima della deviazione standard ed è valida quando $NB - A^2 / N^2$ è maggiore di 0,3.

Per ottenere i valori della tensione U_{50} basterà utilizzare la formula 2.3 ponendo U_{50} come incognita. Questo non vale per la deviazione standard in quanto non rappresenterebbe la deviazione standard di U_{50} difatti ogni calcolo che coinvolge questo termine va eseguito nei termini della tensione normalizzata e solo al termine trasformata nella grandezza voluta.

Intervallo di confidenza

Normalmente la deviazione standard di un campione è data da $\sigma_m = \sigma / \sqrt{N}$ dove σ è la deviazione standard della popolazione e N è il campione di misura. In questo caso, l'espressione va moltiplicata per un fattore che chiameremo G e la formula per l'errore standard diventerà:

$$\sigma_m = \frac{G\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.8)$$

e G dipenderà dal rapporto d/σ e dal valore della media del livello considerato. Nel grafico di figura 2.2 è rappresentato G in funzione di d/σ . Il valore

medio della tensione del livello in prova non incide su G finchè l'intervallo d è piccolo. La linea continua del grafico rappresenta il valore di G quando il valore medio cade su uno dei livelli di prova, mentre la linea tratteggiata dà il valore quando la media cade tra due livelli. Per tutti gli altri casi i valori si situano tra i due rami. Per un intervallo di confidenza al 95% useremo la seguente dicitura:

$$y \pm (1,96\sigma_m) \quad (2.9)$$

Chiamiamo σ_s la stima della deviazione standard, generalmente è dato dalla formula $\sigma/\sqrt{2N}$ ma in questo caso dobbiamo applicare un ulteriore fattore correttivo H . Scriveremo allora:

$$\sigma_s = \frac{H\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.10)$$

dove il valore $1/\sqrt{2N}$ è incorporato nel fattore H . Possiamo trovare H nel grafico della figura 2.2.

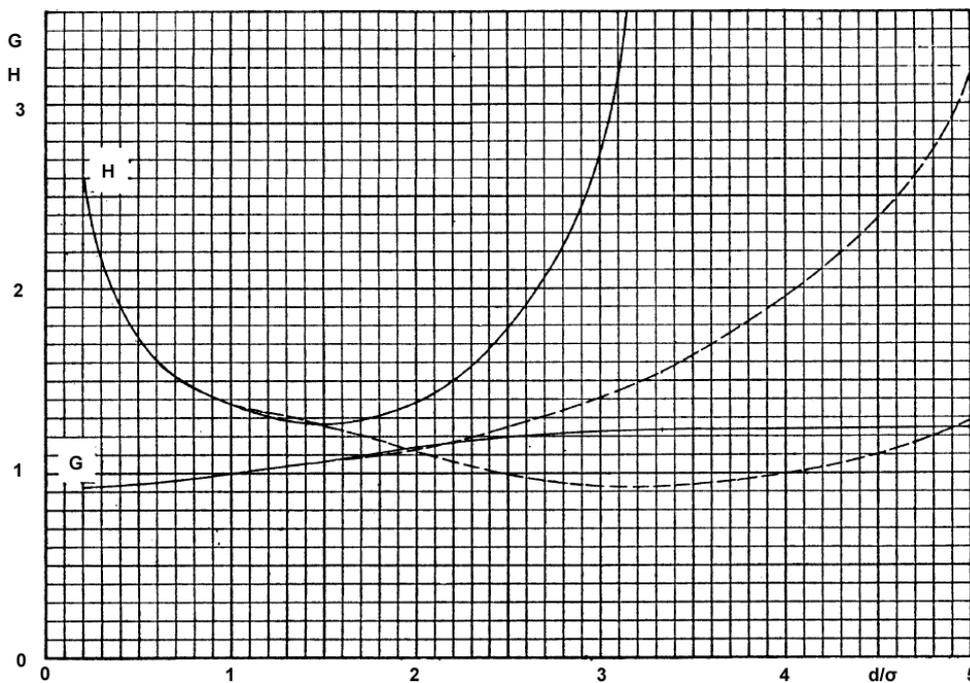


Figura 2.2: Rappresentazione di $G=f(\frac{d}{\sigma})$ e di $H=f(\frac{d}{\sigma})$

Per ottenere un intervallo di confidenza useremo la seguente dicitura:

$$y \pm (k' \sqrt{\sigma_m^2 + k^2 \sigma_s^2}) \quad (2.11)$$

dove k' sarà uguale a 2,576, 1,96 o 1,645 a seconda che si voglia l'intervallo di confidenza di y rispettivamente al 99%, 95% o 90%.

Capitolo 3

Analisi dei dati sperimentali

In questo capitolo verranno analizzati i dati ottenuti dalle prove alle varie distanze dei conduttori e con i diversi metodi elencati in precedenza. Per ogni configurazione verranno utilizzati impulsi di fulminazione con polarità sia positiva che negativa, ciò per delineare le differenze di comportamento che si verificano. Avremo quindi:

- prove a 55 mm con metodo dei livelli multipli, up-and-down a polarità positiva e negativa
- prove a 75 mm con metodo dei livelli multipli, up-and-down a polarità positiva e negativa
- prove a 95 mm con metodo dei livelli multipli, up-and-down a polarità positiva e negativa
- prove a 115 mm con metodo dei livelli multipli, up-and-down a polarità positiva e negativa

Per ogni rilevamento sperimentale, quindi per ogni impulso inviato dal generatore, è opportuno attendere minimo 30 secondi per dare il tempo al dielettrico, in caso di scarica, di ripristinare le proprie proprietà dielettriche. In questo modo avremo prove indipendenti dagli eventi precedenti. In figura 3.1 si possono osservare la geometria dei conduttori e la loro disposizione

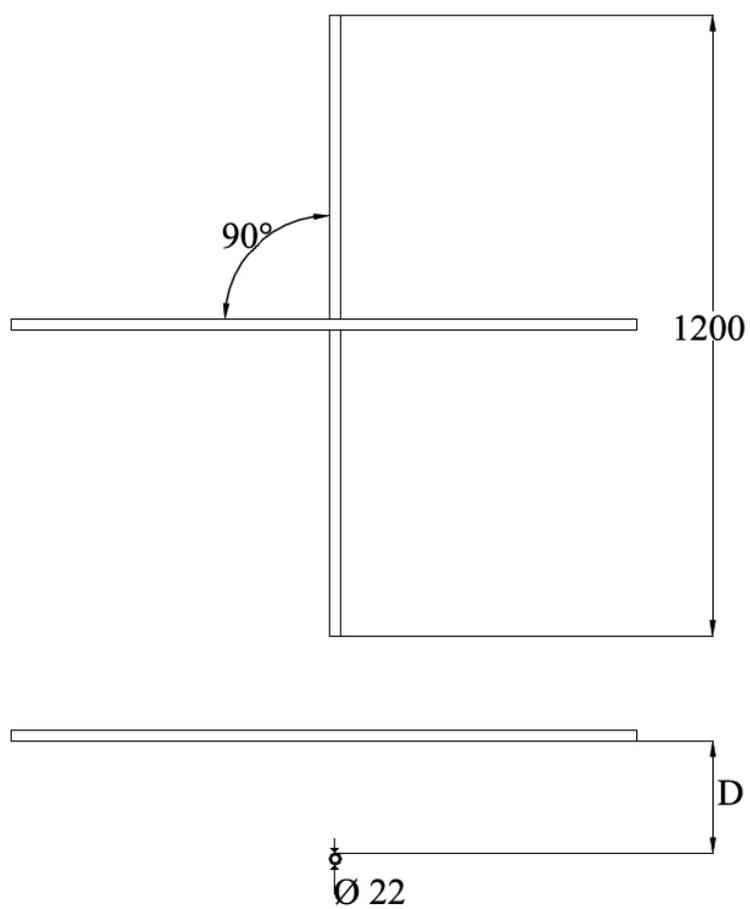


Figura 3.1: Schema disposizione conduttori e loro dimensioni in [mm]

nello spazio. Il “tubo” superiore sarà collegato al generatore di impulsi mentre il restante a terra.

3.1 Distanza cilindri 55 mm

In tabella 3.1 sono riportate le condizioni ambientali registrate al momento della prova.

| Metodo | Polarità | Umidità [%] | t [°C] | H [mbar] | k |
|----------|----------|-------------|--------|----------|------|
| Classe 1 | + | 61,80 | 26,2 | 1011 | 0,98 |
| Classe 2 | + | 52,00 | 29,0 | 1015 | 0,97 |
| Classe 1 | - | 61,80 | 26,2 | 1011 | 0,98 |
| Classe 2 | - | 51,80 | 29,2 | 1015 | 0,97 |

Tabella 3.1: Condizioni ambientali D=55 mm

3.1.1 Metodo dei livelli multipli

Con questa distanza degli elettrodi si riscontra un’ottima separazione tra fenomeno di scarica e di non scarica. Di seguito è descritta l’analisi delle prove effettuate con polarità positiva e negativa dell’impulso di fulminazione.

Polarità positiva

In tabella 3.2 è riportata la media dei dati sperimentali ottenuti dalle prove. U_p rappresenta la tensione di prova e p la probabilità di scarica per data tensione.

Rappresentando i dati della tabella 3.2 nel grafico di figura 3.2 avente come asse delle ascisse U_p [kV] e delle ordinate p [%], otteniamo un andamento costante crescente della curva ed un’improvvisa caduta della rigidità

| U_p [kV] | 119,8 | 122,5 | 127,4 | 129,8 | 132,4 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p [%] | 0 | 0 | 10 | 20 | 100 |

Tabella 3.2: Risultati prove di classe 1 D=55 mm polarità positiva

dielettrica, difatti otteniamo una sicura scarica incrementando del 2% la tensione con probabilità d'evento del 20%. Dal grafico di figura 3.2 è possi-

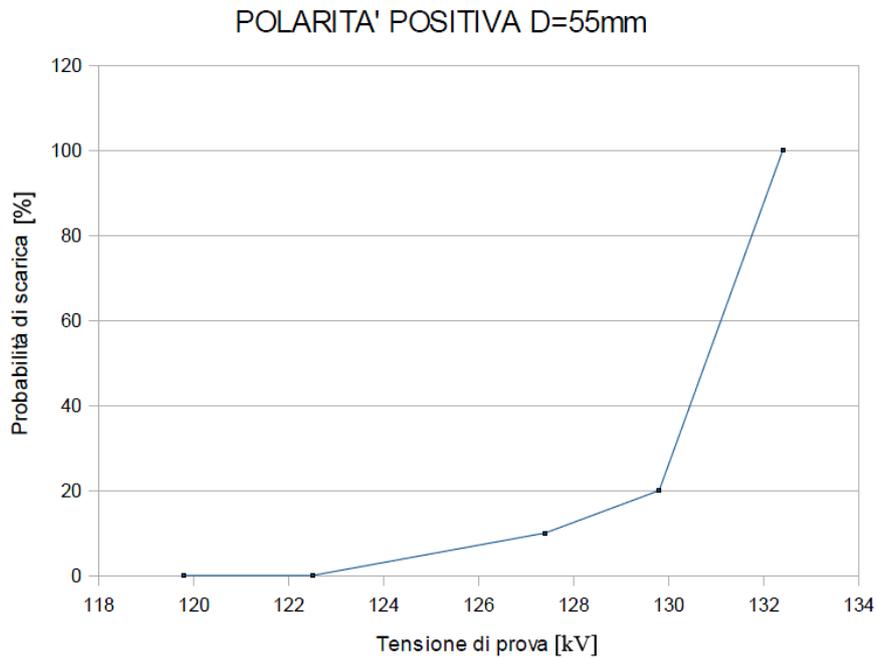


Figura 3.2: Grafico $p=f(U_p)$ D=55 mm polarità positiva

bile estrapolare il valore di U'_{50} che risulta $130,8$ kV. Questa tensione però deve essere normalizzata alla temperatura di 20 °C ed alla pressione di 1013 mbar utilizzando un calcolato coefficiente di correzione k secondo il paragrafo 1.1 pari a $k=0,98$. A fronte di ciò l'effettiva U_{50} sarà di $133,4$ kV. Per quanto detto nel paragrafo 2.1.1 possiamo definire l'intervallo di confidenza al 95%, ottenendo:

$$U_{50} = 133,4 \pm 1,7 \text{ kV} \quad (3.1)$$

Polarità negativa

In tabella 3.3 sono riportate le medie dei dati sperimentali dove U_p rappresenta la tensione di prova e p la probabilità di scarica per data tensione.

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| U_p [kV] | 116,2 | 117,8 | 119,2 | 120,7 |
| p [%] | 0 | 40 | 100 | 100 |

Tabella 3.3: Risultati prove di classe 1 D=55 mm polarità negativa

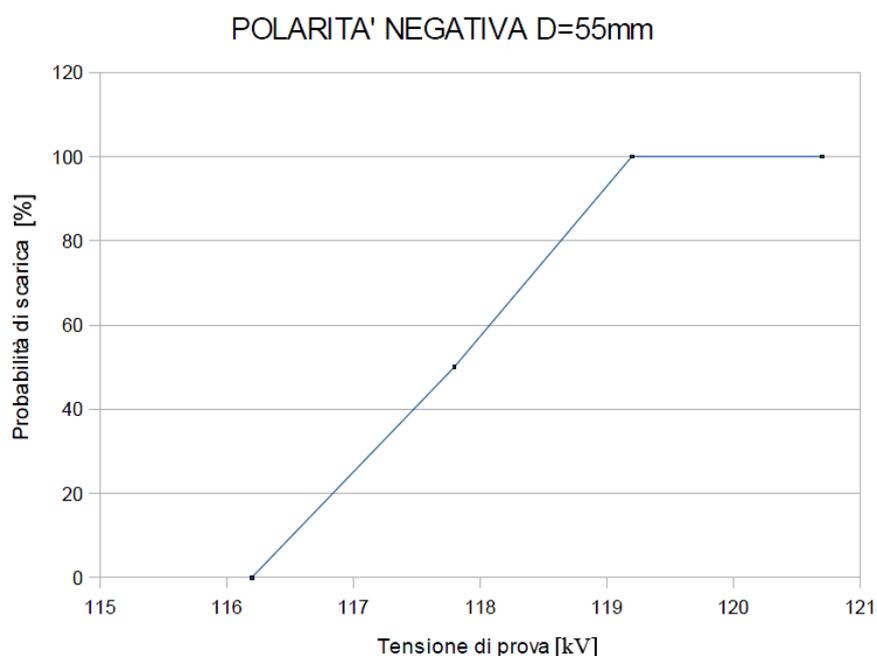


Figura 3.3: Grafico $p=f(U_p)$ polarità negativa

Rappresentando i dati della tabella 3.3 nel grafico di figura 3.3, si ottiene un andamento lineare crescente della curva, passando da probabilità di scarica nulla a scarica certa con un incremento della tensione del 2,6%. Dal grafico 3.3 si estrapola il valore di U'_{50} ottenendo 117,8 kV. Tale tensione normalizzata, utilizzando un calcolato coefficiente di correzione $k=0,98$, risulta di 120,2 kV. Definendo l'intervallo di confidenza al 95% è possibile scrivere:

$$U_{50} = 120,2 \pm 0,8 \text{ kV} \quad (3.2)$$

3.1.2 Metodo up-and-down

Con questo procedimento, come enunciato nel paragrafo 2.2, si concentra la ricerca direttamente su U_{50} . Perciò risulta più adatto, rispetto al metodo precedente, per questa tipologia di ricerca. Qui di seguito verranno riportati solo i risultati utili ai fini della ricerca poichè il metodo operativo è ampiamente illustrato nel paragrafo 2.2.

Polarità positiva

Nella figura 3.4 è riportata la tabella dell'up-and-down, dove la "x" rappresenta l'evento di scarica mentre la "o" la tenuta del dielettrico per ogni livello di tensione. Viene utilizzato un passo per ogni grado pari a $0,1 \text{ div}$. Da questi dati si ricava la tabella 3.4 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.4.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 5,6 | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | | | | x | | | | x | | x | | x | | x | | x | | x | | x | |
| 5,5 | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 3.4: Tabella up-and-down D=55 mm polarità positiva

| | |
|----|----|
| x | o |
| 12 | - |
| 5 | 12 |
| 1 | 6 |
| - | 1 |

Tabella 3.4: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=55 mm polarità positiva

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.5 necessari per ottenere U'_{50} e l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $139,88 \text{ kV}$ e $0,78 \text{ kV}$.

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 29 | 53 | 0,1 | 18 | 5,4 | 5,51 | 0,06 | 1,09 | 0,02 |

Tabella 3.5: Valori calcolati prova di classe 2 D=55 mm polarità positiva

Come nel caso precedente vanno normalizzati i valori delle tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un coefficiente di correzione $k=0,97$ e quindi la tensione al 50% sarà

$$U_{50} = 144,21 \pm 0,8 \text{ kV} \quad (3.3)$$

E' possibile confrontare questo risultato con il valore medio delle tensioni di

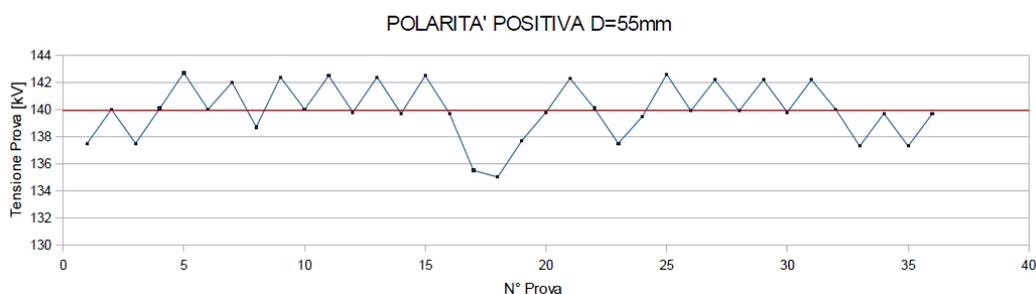


Figura 3.5: Tabella media tensioni di prova D=55 mm polarità positiva

prova dalla figura 3.5. Si osserva che il valore medio rappresentato dalla linea rossa ($140,0 \text{ kV}$ che normalizzato risulta $144,3 \text{ kV}$) si discosta di poco dal valore di U_{50} calcolato in precedenza, ciò ad indicare la buona approssimazione che si commetterebbe eseguendo la mera media delle tensioni di prova indicata dalle normative.

Polarità negativa

Nella figura 3.6 è riportata la tabella dell'up-and-down, dove la "x" rappresenta l'evento di scarica mentre la "o" la tenuta del dielettrico per ogni livello di tensione. Abbiamo utilizzato un passo per ogni grado pari a $0,1 \text{ div}$. Da questi dati ricaviamo la tabella 3.6 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.6.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | | | | | | | | | |
| 5,3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | | | |
| 5,2 | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | | |
| 5,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 3.6: Tabella up-and-down D=55 mm polarità negativa

| | |
|----|----|
| x | o |
| 19 | - |
| 2 | 19 |
| - | 2 |

Tabella 3.6: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=55 mm polarità negativa

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.7 necessari per ottenere U'_{50} e l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $127,9 \text{ kV}$ e $0,7 \text{ kV}$. Come nel caso

| A | B | d | y | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|-----|----|-----|-------|----------|-----|------------|
| 19 | 19 | 0,1 | 5,1 | 21 | 5,1 | 5,24 | 0,02 | 3,6 | 0,01 |

Tabella 3.7: Valori calcolati prova di classe 2 D=55 mm polarità negativa

precedente dobbiamo normalizzare i valori delle tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un coefficiente di correzione $k=0,97$ e quindi la tensione al 50% sarà

$$U_{50} = 131,9 \pm 0,7 \text{ kV} \quad (3.4)$$

Dal grafico 3.7 si ricava il valore medio delle varie misure ($128,0 \text{ kV}$ il quale normalizzato risulta $131,9 \text{ kV}$) che si discosta di poco dal valore di U_{50} .

3.1.3 Confronto tra i due metodi

Dai dati ottenuti per la prova di classe 1, si rileva dal grafico in figura 3.3 un comportamento più lineare della curva che rappresenta la probabilità

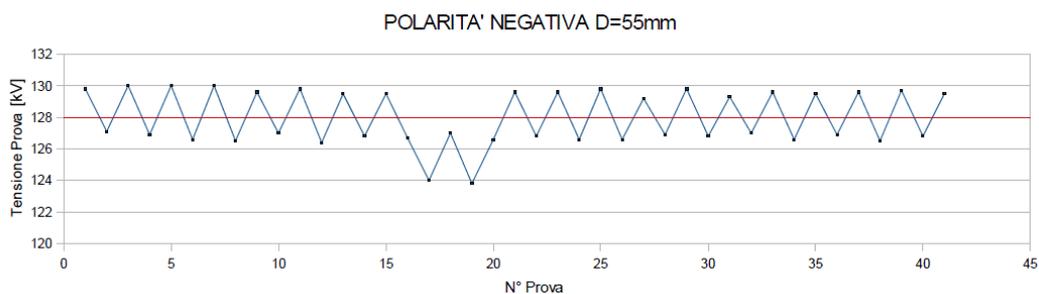


Figura 3.7: Tabella media tensioni di prova $D=55$ mm polarità negativa di scarica rispetto al grafico rappresentato in figura 3.2. Oltre a ciò, è determinate la U_{50} , infatti c'è notevole differenza tra i due casi:

- Classe 1 polarità positiva $U_{50} = 133,4 \pm 1,7$ kV
- Classe 1 polarità negativa $U_{50} = 120,2 \pm 0,8$ kV

Per quanto riguarda la differenza tra polarità negativa e positiva, con il metodo up-and-down si ha una riconferma di quanto accaduto in precedenza, infatti:

- Classe 2 polarità positiva $U_{50} = 144,2 \pm 0,8$ kV
- Classe 2 polarità negativa $U_{50} = 131,9 \pm 0,7$ kV

Analizzando i dati delle prove si ha una differenza del 8% confrontando i due metodi con polarità positiva e del 10% con la restante polarità. Questo può essere dovuto ad un errore nell'eseguire una delle due prove.

3.2 Distanza cilindri 75 mm

In tabella 3.8 sono riportate le condizioni ambientali registrate al momento della prova.

| Metodo | Polarità | Umidità [%] | t [°C] | H [mbar] | k |
|----------|----------|-------------|--------|----------|------|
| Classe 1 | + | 63,10 | 26,8 | 1010 | 0,97 |
| Classe 2 | + | 51,40 | 29,9 | 1015 | 0,97 |
| Classe 1 | - | 63,10 | 26,8 | 1010 | 0,97 |
| Classe 2 | - | 51,40 | 29,9 | 1015 | 0,97 |

Tabella 3.8: Condizioni ambientali D=75 mm

3.2.1 Metodo dei livelli multipli

Con questa configurazione e utilizzando la polarità negativa, si verifica un'ottima separazione tra fenomeno di scarica e di non scarica. Invece con la polarità positiva si presenta un'escursione maggiore del valore della tensione tra i primi eventi di scarica e la scarica certa.

Polarità positiva

In tabella 3.9 è riportata la media dei dati sperimentali ottenuti dalle prove. Rappresentando i dati della tabella 3.9 nel grafico di figura 3.8, si

| | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U_p [kV] | 153,0 | 154,7 | 156,6 | 158,3 | 161,8 | 163,1 |
| p [%] | 10 | 30 | 40 | 30 | 90 | 100 |

Tabella 3.9: Risultati prove di classe 1 D=75 mm polarità positiva

ottiene un andamento crescente della curva fino a $156,6$ kV dove subisce una diminuzione della probabilità di scarica per poi tornare ad avere un andamento crescente dai $158,3$ kV. Incrementando del 6,54% la tensione con probabilità di scarica del 10% si ottiene una sicura scarica. Dal grafico 3.8 è possibile estrapolare il valore di U'_{50} che risulta $159,5$ kV. Tale tensione, normalizzata utilizzando un coefficiente di correzione pari a $k=0,97$, risulta di $133,4$ kV. Si definisce l'intervallo di confidenza al 95%, ottenendo

$$U_{50} = 164,4 \pm 1,5 \text{ kV} \quad (3.5)$$

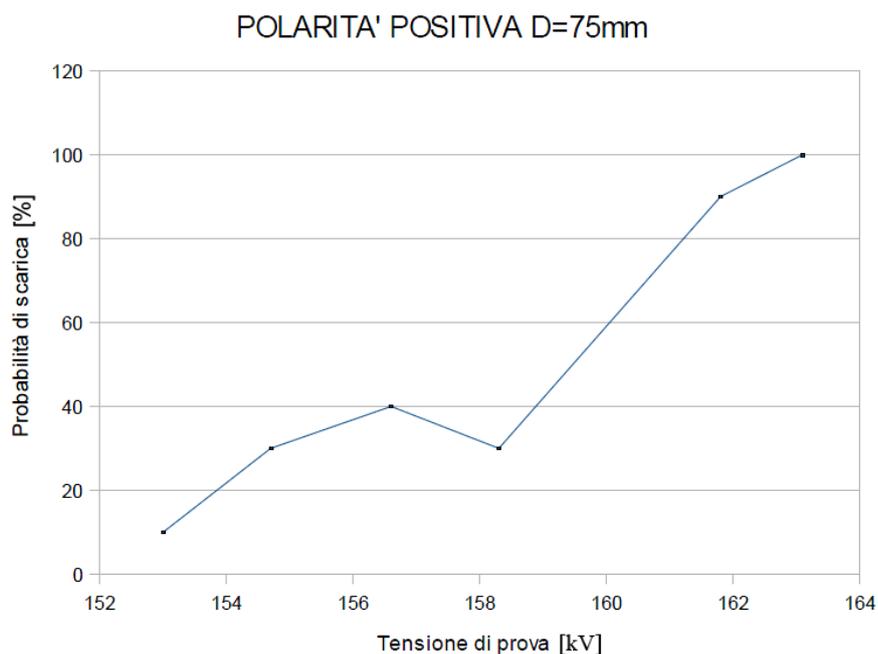


Figura 3.8: Grafico $p=f(U_p)$ D=75 mm polarità positiva

Polarità negativa

In tabella 3.10 sono riportate le medie dei dati sperimentali Rappre-

| | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U_p [kV] | 147,7 | 153,3 | 154,3 | 154,9 | 156,6 | 159,3 |
| p [%] | 0 | 0 | 0 | 20 | 100 | 100 |

Tabella 3.10: Risultati prova di classe 1 D=75 mm polarità negativa

sentando i dati della tabella 3.10 nel grafico di figura 3.9, si ottiene un andamento lineare crescente della curva, passando da probabilità di scarica nulla a scarica certa con un incremento della tensione del $2,54\%$. Dal grafico 3.9 si estrapola il valore di U'_{50} ottenendo $155,5$ kV. Tale tensione normalizzata, utilizzando un calcolato coefficiente di correzione $k=0,97$, risulta di $160,3$ kV. Definendo l'intervallo di confidenza al 95% è possibile scrivere:

$$U_{50} = 160,3 \pm 0,6 \text{ kV} \quad (3.6)$$

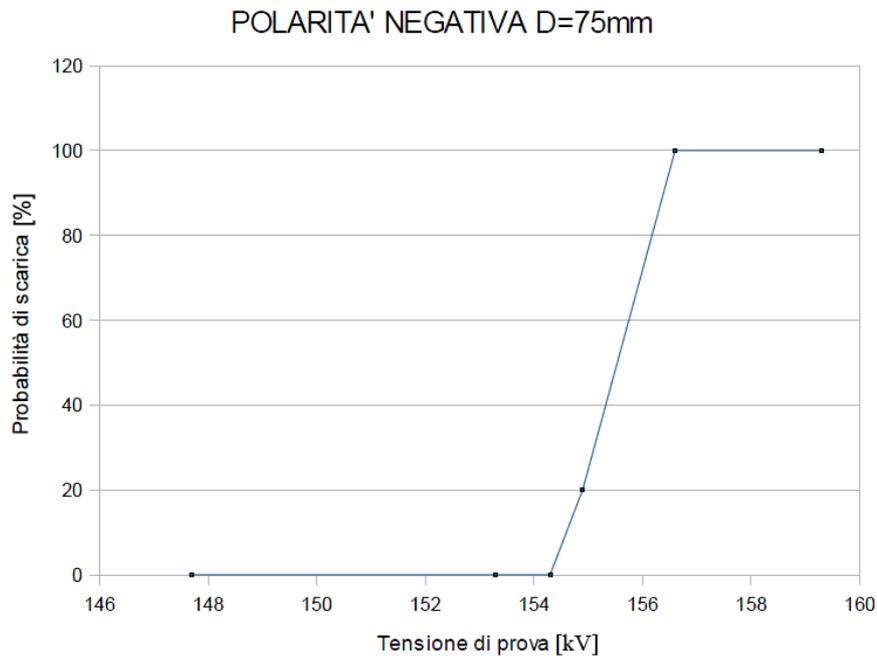


Figura 3.9: Grafico $p=f(U_p)$ D=75 mm polarità negativa

3.2.2 Metodo up-and-down

Di seguito verranno riportati solo i risultati utili ai fini della ricerca poichè il metodo operativo è ampiamente illustrato nel paragrafo 2.2.

Polarità positiva

Nella figura 3.10 è riportata la tabella dell'up-and-down di scarica e tenuta del dielettrico. Da questi dati si ricava la tabella 3.11 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.10.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|--|---|---|---|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | | | | | | | | |
| 6.4 | x | x | x | x | | | | | | | x | | | | x | | | | | x | | | | | x | | | x | | | x | | | | | | x | | | | x | | | | x | | | |
| 6.3 | o | o | o | o | x | x | | | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | x | | o | | |
| 6.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 3.10: Tabella up-and-down D=75 mm polarità positiva

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.12 necessari per ottenere U'_{50} e l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $160,3 \text{ kV}$ e $0,6 \text{ kV}$.

| x | o |
|----|----|
| 13 | - |
| 7 | 13 |
| - | 7 |

Tabella 3.11: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=75 mm polarità positiva

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 13 | 13 | 0,1 | 20 | 6,3 | 6,32 | 0,04 | 1,21 | 0,01 |

Tabella 3.12: Valori calcolati prova di classe 2 D=75 mm polarità positiva

Come nel caso precedente vanno normalizzati i valori delle tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un fattore $k=0,97$ e quindi la tensione al 50% sarà

$$U_{50} = 165,2 \pm 0,6 \text{ kV} \quad (3.7)$$

E' anche possibile confrontare questo risultato con il valore medio delle

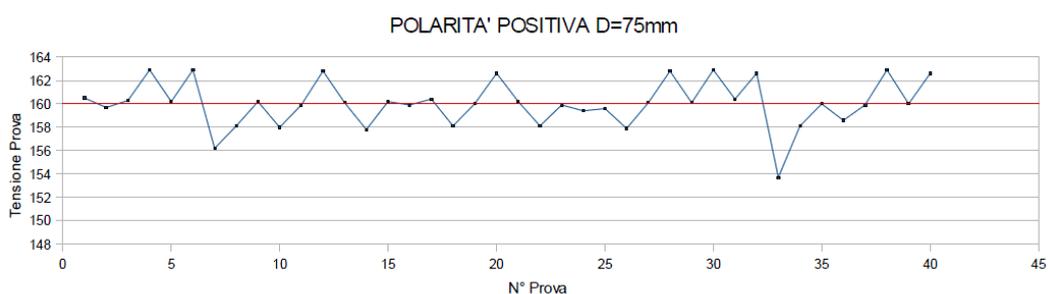


Figura 3.11: Tabella media tensioni di prova D=75 mm polarità positiva

tensioni di prova dalla figura 3.11. Si osserva anche in questo caso e in quelli futuri che il valore medio rappresentato dalla linea rossa ($160,0 \text{ kV}$ che normalizzato risulta $165,0 \text{ kV}$) si discosta di poco dal valore di U_{50} .

Polarità negativa

Nella figura 3.12 è riportata la tabella dell'up-and-down. Da questi dati ricaviamo la tabella 3.13 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.12.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | | | | | | | | | |
| 6,4 | | x | | x | | x | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 3.12: Tabella up-and-down D=75 mm polarità negativa

| | |
|----|----|
| x | o |
| 4 | - |
| 18 | 4 |
| 2 | 17 |
| - | 2 |

Tabella 3.13: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=75 mm polarità negativa

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.14 necessari per ottenere U'_{50} e l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $153,4 \text{ kV}$ e $0,5 \text{ kV}$. Come nel caso precedente

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 25 | 33 | 0,1 | 23 | 5,1 | 6,26 | 0,05 | 1,16 | 0,01 |

Tabella 3.14: Valori calcolati prova di classe 2 D=75 mm polarità negativa

vanno normalizzati i valori delle tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un fattore correttivo $k=0,97$ e quindi la tensione al 50% sarà

$$U_{50} = 158,2 \pm 0,6 \text{ kV} \quad (3.8)$$

Dal grafico 3.13 si ricava il valore medio delle varie misure ($153,2 \text{ kV}$ il

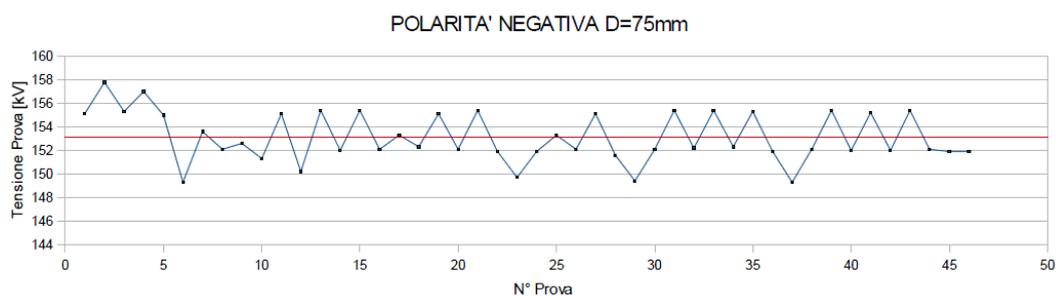


Figura 3.13: Tabella media tensioni di prova $D=75$ mm polarità negativa (il cui valore normalizzato risulta $158,0$ kV) che si discosta di poco dal valore di U_{50} .

3.2.3 Confronto tra i due metodi

Dai dati ottenuti per la prova di classe 1, si può osservare, dal grafico in figura 3.9, un comportamento più lineare della curva che rappresenta la probabilità di scarica rispetto al grafico rappresentato in figura 3.8 il quale presenta uno strano andamento. Oltre a ciò, è determinata la U_{50} , infatti c'è differenza tra i due casi seppur minore che nella configurazione con $D=55$ mm:

- Classe 1 polarità positiva $U_{50} = 164,4 \pm 1,5$ kV
- Classe 1 polarità negativa $U_{50} = 160,3 \pm 0,6$ kV

Per quanto riguarda la differenza tra polarità negativa e positiva risulta che la prima ha un valore di U_{50} più basso rispetto alla seconda:

- Classe 2 polarità positiva $U_{50} = 165,2 \pm 0,6$ kV
- Classe 2 polarità negativa $U_{50} = 158,2 \pm 0,6$ kV

Analizzando i dati delle prove si hanno valori molto simili per entrambe le polarità, infatti i valori differiscono dello 0,5% per la positiva e del 1,34% per la restante. Questo conferma la bontà e la riproducibilità delle prove eseguite e quindi un valore di U_{50} attendibile.

3.3 Distanza cilindri 95 mm

In tabella 3.15 sono riportate le condizioni ambientali registrate al momento della prova.

| Metodo | Polarità | Umidità [%] | t [°C] | H [mbar] | k |
|----------|----------|-------------|--------|----------|------|
| Classe 1 | + | 62,00 | 26,9 | 1010 | 0,97 |
| Classe 2 | + | 51,10 | 29,2 | 1014 | 0,97 |
| Classe 1 | - | 62,00 | 26,9 | 1010 | 0,97 |
| Classe 2 | - | 51,10 | 29,2 | 1014 | 0,97 |

Tabella 3.15: Condizioni ambientali D=95 mm

3.3.1 Metodo dei livelli multipli

Con questa distanza tra gli elettrodi si comincia a perdere, con entrambe le polarità, l'ottima separazione tra fenomeno di scarica e di non scarica che si verificava nei casi precedenti. Rimane il comportamento migliore dato dalla polarità negativa. Di seguito viene riportata l'analisi delle prove effettuate.

Polarità positiva

In tabella 3.16 è riportata la media dei dati sperimentali ottenuti dalle prove. Riportando i dati della tabella 3.16 nel grafico di figura 3.14, si

| | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U_p [kV] | 177,1 | 182,1 | 187,1 | 189,8 | 192,3 | 194,8 | 197,7 |
| p [%] | 10 | 40 | 60 | 50 | 60 | 70 | 80 |

Tabella 3.16: Risultati prova di classe 1 D=95 mm polarità positiva

ottiene un andamento crescente della curva fino a $187,1$ kV dove subisce una diminuzione della probabilità di scarica per poi tornare ad avere un

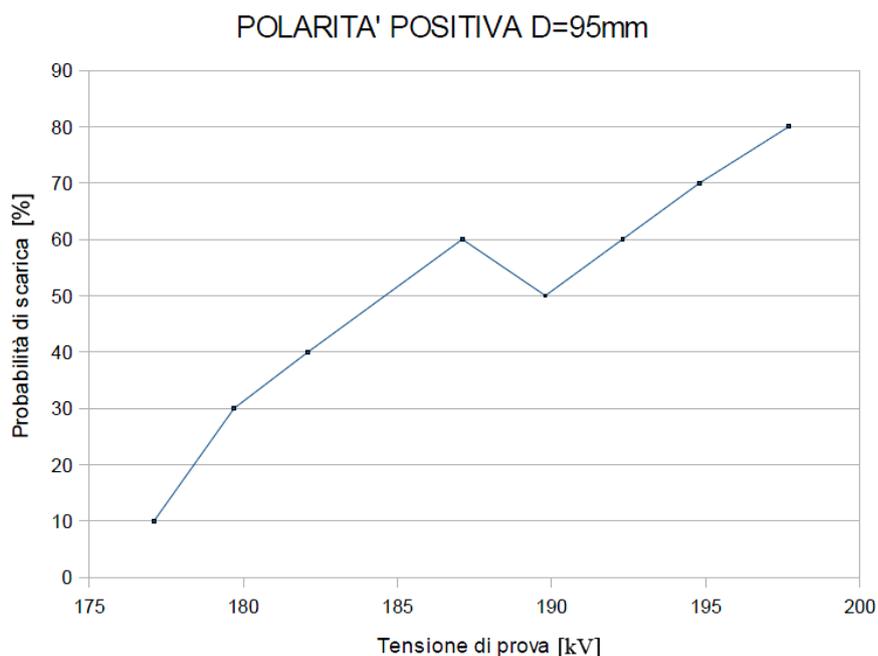


Figura 3.14: Grafico $p=f(U_p)$ D=95 mm polarità positiva

andamento costante crescente dai $189,8 \text{ kV}$. Passiamo dalla probabilità di scarica del 10% ad una del 80% incrementando la tensione di prova del $11,63\%$, un range notevole a confermare la perdita della buona separazione tra scarica e non scarica che avveniva con i metodi precedenti. Dal grafico 3.14 è possibile estrapolare il valore di U'_{50} che risulta $189,8 \text{ kV}$. Tale tensione, normalizzata utilizzando un coefficiente di correzione pari a $k=0,97$, risulta di $195,7 \text{ kV}$. Si definisce l'intervallo di confidenza al 95% , ottenendo

$$U_{50} = 195,7 \pm 9,2 \text{ kV} \quad (3.9)$$

Polarità negativa

In tabella 3.17 sono riportate la media dei dati sperimentali Rappresentando i dati della tabella 3.17 nel grafico di figura 3.15, si ottiene un andamento lineare crescente della curva fino ad una tensione di $200,1 \text{ kV}$ dove si avverte un pianerottolo che termina ai $202,9 \text{ kV}$ e riprende a salire con pendenza minore. Si passa da probabilità di scarica nulla a scarica con probabilità

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| U_p [kV] | 196,4 | 200,1 | 202,9 | 205,5 |
| p [%] | 0 | 70 | 70 | 80 |

Tabella 3.17: Risultati prova di classe 1 D=95 mm polarità negativa

del 80% incrementando la tensione del 4,63%, decisamente minore rispetto alla polarità positiva (11,63%). Dal grafico 3.15 si estrapola il valore di U'_{50}

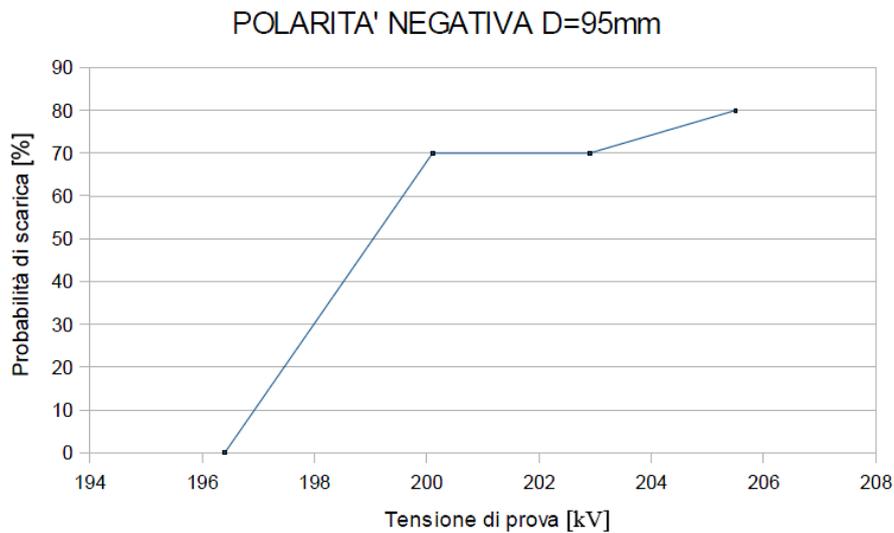


Figura 3.15: Grafico $p=f(U_p)$ D=95 mm polarità negativa

ottenendo $199,0$ kV. Tale tensione normalizzata, utilizzando un calcolato coefficiente di correzione $k=0,97$, risulta di $205,2$ kV. Definendo l'intervallo di confidenza al 95% è possibile scrivere:

$$U_{50} = 205,2 \pm 1,4 \text{ kV} \quad (3.10)$$

3.3.2 Metodo up-and-down

Di seguito verranno riportati solo i risultati utili ai fini della ricerca poiché il metodo operativo è ampiamente illustrato nel paragrafo 2.2.

Polarità positiva

Nella figura 3.16 è riportata la tabella dell'up-and-down di scarica e tenuta del dielettrico. Da questi dati si ricava la tabella 3.18 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.16.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|--|--|--|
| 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 3.16: Tabella up-and-down D=95 mm polarità positiva

| | |
|----|----|
| x | o |
| 7 | - |
| 11 | 7 |
| 5 | 11 |
| - | 6 |

Tabella 3.18: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=95 mm polarità positiva

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.19 necessari per ottenere U'_{50} e l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $187,3 kV$ e $0,9 kV$. Normalizzando i valori delle

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 25 | 39 | 0,1 | 23 | 7,3 | 7,36 | 0,09 | 1,02 | 0,02 |

Tabella 3.19: Valori calcolati prova di classe 2 D=95 mm polarità positiva

tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un fattore $k=0,97$ si ottiene il seguente valore della U_{50}

$$U_{50} = 193,1 \pm 1,0 kV \quad (3.11)$$

Dal grafico di figura 3.19 si ricava il valore medio delle varie misure ($186,6$

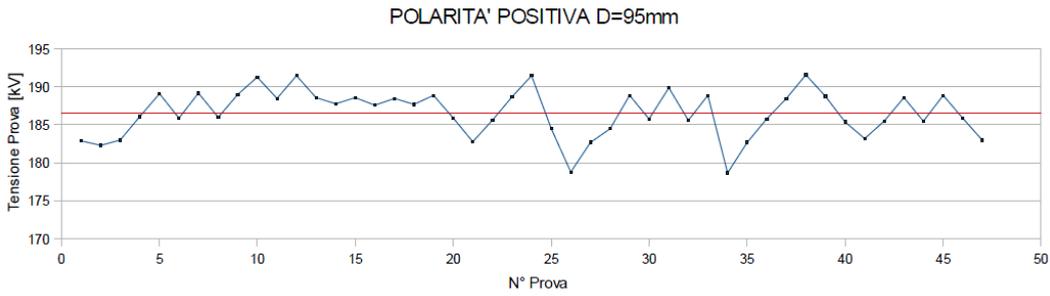


Figura 3.17: Tabella media tensioni di prova $D=95$ mm polarità positiva kV il quale normalizzato risulta $192,5 kV$) che si discosta di poco dal valore di U_{50} .

Polarità negativa

Nella figura 3.18 è riportata la tabella dell'up-and-down. Da questi dati ricaviamo la tabella 3.20 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.18.

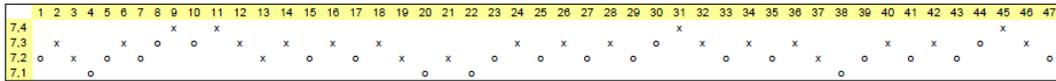


Figura 3.18: Tabella up-and-down $D=95$ mm polarità negativa

| | |
|----|----|
| x | o |
| 4 | - |
| 15 | 4 |
| 5 | 15 |
| - | 4 |

Tabella 3.20: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 $D=95$ mm polarità negativa

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.21 necessari per ottenere U'_{50} e l'intervallo di confidenza

al 95% che risultano rispettivamente di $179,4 \text{ kV}$ e $0,8 \text{ kV}$. Come nel ca-

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 23 | 31 | 0,1 | 23 | 7,1 | 7,25 | 0,06 | 1,08 | 0,01 |

Tabella 3.21: Valori calcolati prova di classe 2 D=95 mm polarità negativa

so precedente dobbiamo normalizzare i valori delle tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un coefficiente correttivo pari a $k=0,97$ e quindi la tensione al 50% sarà

$$U_{50} = 185,0 \pm 0,7 \text{ kV} \quad (3.12)$$

Dal grafico 3.19 si ricava il valore medio delle varie misure ($179,5 \text{ kV}$ il

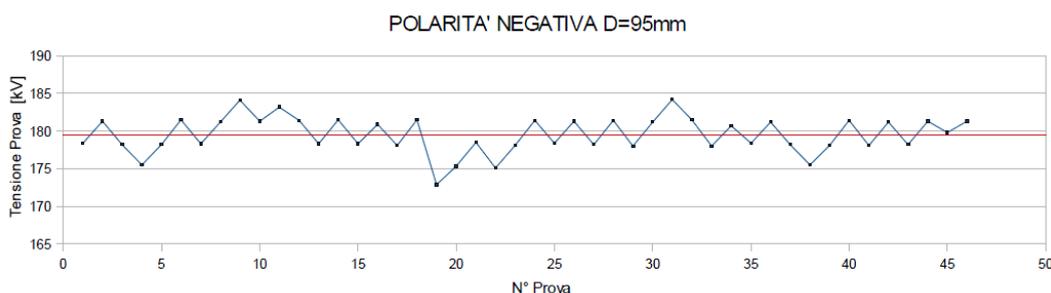


Figura 3.19: Tabella media tensioni di prova D=95 mm polarità negativa

quale normalizzato risulta $186,1 \text{ kV}$) che si discosta di poco dal valore di U_{50} .

3.3.3 Confronto tra i due metodi

Dai dati ottenuti per la prova di classe 1, si osserva dal grafico in figura 3.15 un comportamento più lineare della curva che rappresenta la probabilità di scarica rispetto al grafico in figura 3.14. Oltre a ciò, è determinate la U_{50} , infatti c'è notevole differenza tra i due casi:

- Classe 1 polarità positiva $U_{50} = 195,7 \pm 9,2 \text{ kV}$

- Classe 1 polarità negativa $U_{50} = 205,2 \pm 1,4$ kV

Per quanto riguarda la differenza tra polarità negativa e positiva, nel metodo up-and-down, risulta che la prima ha un valore di U_{50} più basso rispetto alla seconda, a conferma di quanto accaduto nelle prove precedenti:

- Classe 2 polarità positiva $U_{50} = 193,1 \pm 1,0$ kV
- Classe 2 polarità negativa $U_{50} = 185,0 \pm 0,7$ kV

Analizzando i dati delle prove si hanno valori molto simili per la polarità positiva, infatti differiscono del 1,32% a confermare la bontà e la riproducibilità delle prove eseguite e quindi un valore di U_{50} attendibile. Per la polarità negativa invece si presenta una differenza del 9,84% tra i livelli di tensione, una percentuale troppo grande che potrebbe essere dovuta ad errori di prova.

3.4 Distanza cilindri 115 mm

In tabella 3.22 sono riportate le condizioni ambientali registrate al momento della prova.

| Metodo | Polarità | Umidità [%] | t [°C] | H [mbar] | k |
|----------|----------|-------------|--------|----------|------|
| Classe 1 | + | 51,00 | 30,1 | 1014 | 0,97 |
| Classe 2 | + | 51,00 | 30,1 | 1014 | 0,97 |
| Classe 1 | - | 61,80 | 26,2 | 1011 | 0,98 |
| Classe 2 | - | 51,00 | 30,1 | 1014 | 0,97 |

Tabella 3.22: Condizioni ambientali D=115 mm

3.4.1 Metodo dei livelli multipli

Con questa configurazione si riscontra un andamento non troppo lineare utilizzando la polarità positiva, mentre ciò non accade per la negativa.

Polarità positiva

In tabella 3.23 è riportata la media dei dati sperimentali ottenuti dalle prove.

| | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U_p [kV] | 190,2 | 193,5 | 198,0 | 201,9 | 205,4 | 209,2 | 212,6 |
| p [%] | 20 | 0 | 50 | 30 | 40 | 50 | 80 |

Tabella 3.23: Risultati prova di classe 1 D=115 mm polarità positiva

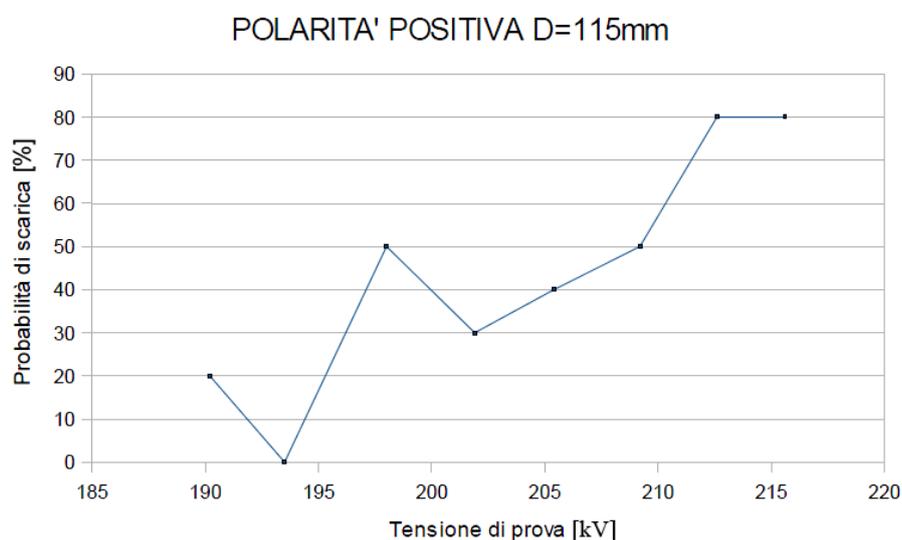


Figura 3.20: Grafico $p=f(U_p)$ D=115 mm polarità positiva

Riportando i dati della tabella 3.23 nel grafico di figura 3.20, si ottiene un andamento imprevisto nel primo tratto di curva fino ai $201,9$ kV per poi stabilizzarsi su un andamento crescente. Passiamo dalla probabilità di scarica del 20% ad una dell' 80% incrementando la tensione del $13,34\%$, un range notevole. Dal grafico 3.20 è possibile estrapolare il valore di U'_{50} che risulta $209,2$ kV. Tale tensione, normalizzata utilizzando un coefficiente di correzione pari a $k=0,97$, risulta di $215,7$ kV. Si definisce l'intervallo di confidenza al 95% , ottenendo

$$U_{50} = 215,7 \pm 2,4 \text{ kV} \quad (3.13)$$

Polarità negativa

Come nel caso precedente, riportiamo la media dei dati sperimentali ottenute dalle varie prove in tabella 3.24 dove U_p rappresenta la tensione di prova e p la probabilità di scarica per data tensione. Rappresentando

| | | | | |
|-------|------|-------|-------|-------|
| U_p | [kV] | 205,4 | 213,0 | 220,6 |
| p | [%] | 0 | 40 | 90 |

Tabella 3.24: Risultati prova di classe 1 D=55 mm polarità negativa

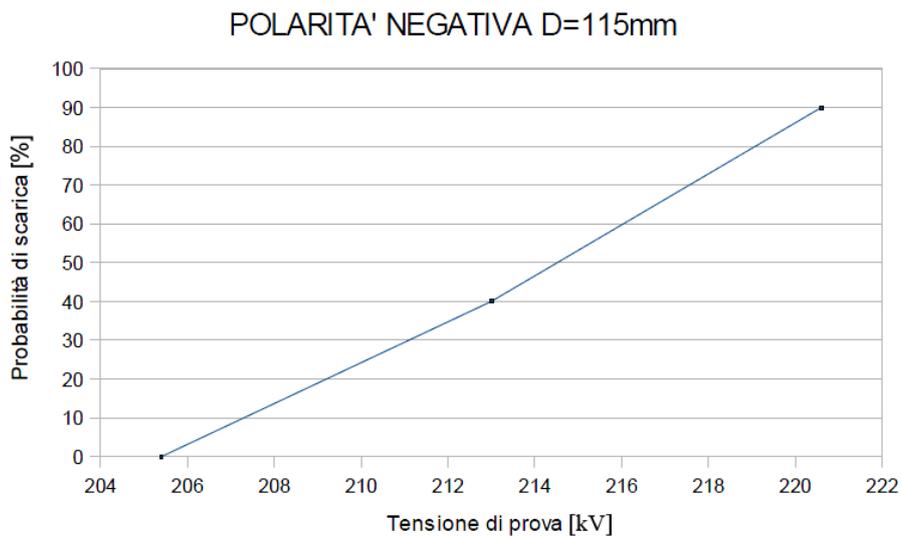


Figura 3.21: Grafico $p=f(U_p)$ D=115 mm polarità negativa

i dati della tabella 3.24 nel grafico di figura 3.21, si ottiene andamento lineare crescente della curva. Si passa da probabilità di scarica nulla a scarica all'80% incrementando la tensione del 7,4%, minore rispetto alla polarità positiva (13,34%). Dal grafico 3.21 si estrapola il valore di U'_{50} ottenendo $214,5 \text{ kV}$. Tale tensione normalizzata, utilizzando un calcolatore

coefficiente di correzione $k=0,98$, risulta di $218,9 \text{ kV}$. Definendo l'intervallo di confidenza al 95% è possibile scrivere:

$$U_{50} = 218,9 \pm 4,0 \text{ kV} \quad (3.14)$$

3.4.2 Metodo up-and-down

Di seguito verranno riportati solo i risultati utili ai fini della ricerca poichè il metodo operativo è ampiamente illustrato nel paragrafo 2.2.

Polarità positiva

Nella figura 3.22 è riportata la tabella dell'up-and-down di scarica e tenuta del dielettrico. Da questi dati si ricava la tabella 3.25 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.22.

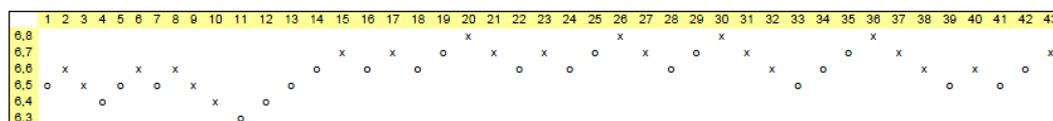


Figura 3.22: Tabella up-and-down D=115 mm polarità positiva

| | |
|---|---|
| x | o |
| 4 | - |
| 8 | 4 |
| 6 | 8 |
| 2 | 7 |
| 1 | 2 |
| - | 1 |

Tabella 3.25: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=115 mm polarità positiva

Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si ricavano i valori in tabella 3.26 necessari per ottenere la U'_{50} e l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $208,1 \text{ kV}$ e $2,3 \text{ kV}$. Normalizzando

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|-----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 54 | 162 | 0,1 | 21 | 6,4 | 6,61 | 0,18 | 0,94 | 0,04 |

Tabella 3.26: Valori calcolati prova di classe 2 D=115mm polarità positiva

i valori delle tensioni alle condizioni ambientali standard utilizzando un fattore $k=0,97$ si ottiene il seguente valore della U_{50}

$$U_{50} = 214,6 \pm 2,4 \text{ kV} \quad (3.15)$$

Dal grafico di figura 3.25 si ricava il valore medio delle varie misure ($207,3$

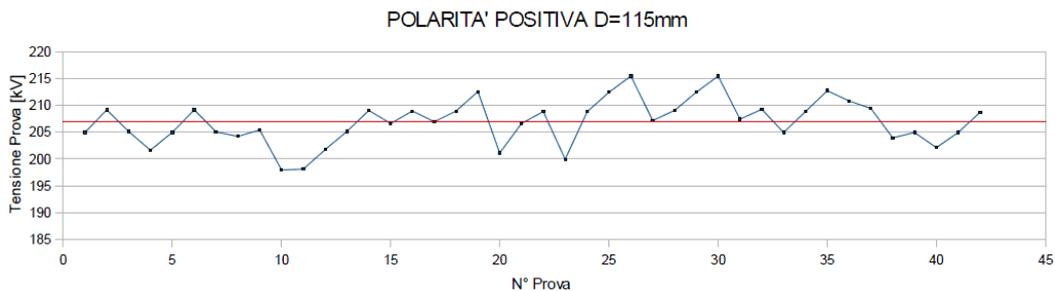


Figura 3.23: Tabella media tensioni di prova D=115 mm polarità positiva

kV il quale normalizzato risulta $213,4 \text{ kV}$) che si discosta di poco dal valore di U_{50} .

Polarità negativa

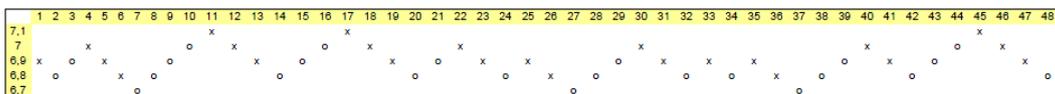


Figura 3.24: Tabella up-and-down D=115 mm polarità negativa

Nella figura 3.24 è riportata la tabella dell'up-and-down. Da questi dati ricaviamo la tabella 3.27 che riassume i successi e gli insuccessi rappresentati nella figura 3.24. Utilizzando le modalità elencate nel paragrafo 2.2.1 si

| x | o |
|----|----|
| 3 | - |
| 7 | 3 |
| 11 | 7 |
| 3 | 11 |
| - | 3 |

Tabella 3.27: Riassunto successi/insuccessi prova di classe 2 D=115 mm polarità negativa

ricavano i valori in tabella 3.28 necessari per ottenere U'_{50} e la l'intervallo di confidenza al 95% che risultano rispettivamente di $211,7 kV$ e $1,5 kV$. Come nel caso precedente dobbiamo normalizzare i valori delle tensioni alle

| A | B | d | N | h' | μ | σ | G | σ_m |
|----|----|-----|----|-----|-------|----------|------|------------|
| 34 | 66 | 0,1 | 24 | 6,7 | 6,89 | 0,13 | 0,96 | 0,02 |

Tabella 3.28: Valori calcolati prova di classe 2 D=115 mm polarità negativa

condizioni ambientali standard utilizzando un coefficiente correttivo $k=0,97$ e quindi la tensione al 50% sarà

$$U_{50} = 218,3 \pm 1,5 kV \quad (3.16)$$

Dal grafico 3.19 si ricava il valore medio delle varie misure ($211,4 kV$ il quale normalizzato risulta $218,0 kV$) che si discosta di poco dal valore di U_{50} .

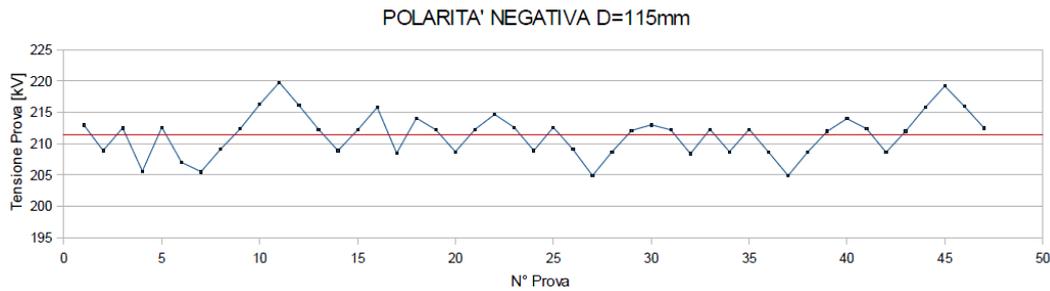


Figura 3.25: Tabella media tensioni di prova D=115 mm polarità negativa

3.4.3 Confronto tra i due metodi

Dai dati ottenuti per la prova di classe 1, si osserva, dal grafico in figura 3.21, un comportamento più lineare della curva che rappresenta la probabilità di scarica rispetto al grafico illustrato in figura 3.20 il quale presenta un andamento inaspettato. Oltre a ciò è utile sottolineare la sottile differenza tra le U_{50} che, considerando il margine di confidenza, si possono considerare equivalenti. Si ha anche un'eliminazione del fenomeno che caratterizzava gli eventi precedenti e cioè la notevole differenza delle U_{50} alle diverse polarità:

- Classe 1 polarità positiva $U_{50} = 215,7 \pm 2,4$ kV
- Classe 1 polarità negativa $U_{50} = 218,9 \pm 4,0$ kV

Con il metodo up-and-down, per quanto riguarda la differenza tra polarità negativa e positiva, risulta anche in questo caso un accavallamento delle U_{50} utilizzando il margine di confidenza che richiama il fenomeno descritto nella prova di classe 1:

- Classe 2 polarità positiva $U_{50} = 214,6 \pm 2,4$ kV
- Classe 2 polarità negativa $U_{50} = 218,3 \pm 1,5$ kV

Analizzando i dati delle prove si hanno valori molto prossimi tra loro che rientrano nel margine di confidenza a confermare la bontà e la riproducibilità delle prove eseguite e quindi un valore di U_{50} attendibile.

In conclusione è possibile considerare attendibile il grafico di figura 3.20 considerando l'evento a 198 kV come isolato in quanto la tensione ottenuta al 50% risulta fedele ai risultati del metodo di classe 2.

Capitolo 4

Analisi dei risultati

Dalle analisi fatte si può costruire il grafico di scarica $V=f(D)$ le cui curve rappresentano, data una certa distanza “ D ” tra i conduttori, la tensione disruptiva. Si parla di curve in quanto sono state utilizzate due polarità e due metodi sperimentali che hanno dato risultati diversi. Il grafico generale che raffigura tutte le curve è riportato in figura 4.1. Di seguito verrà studiato

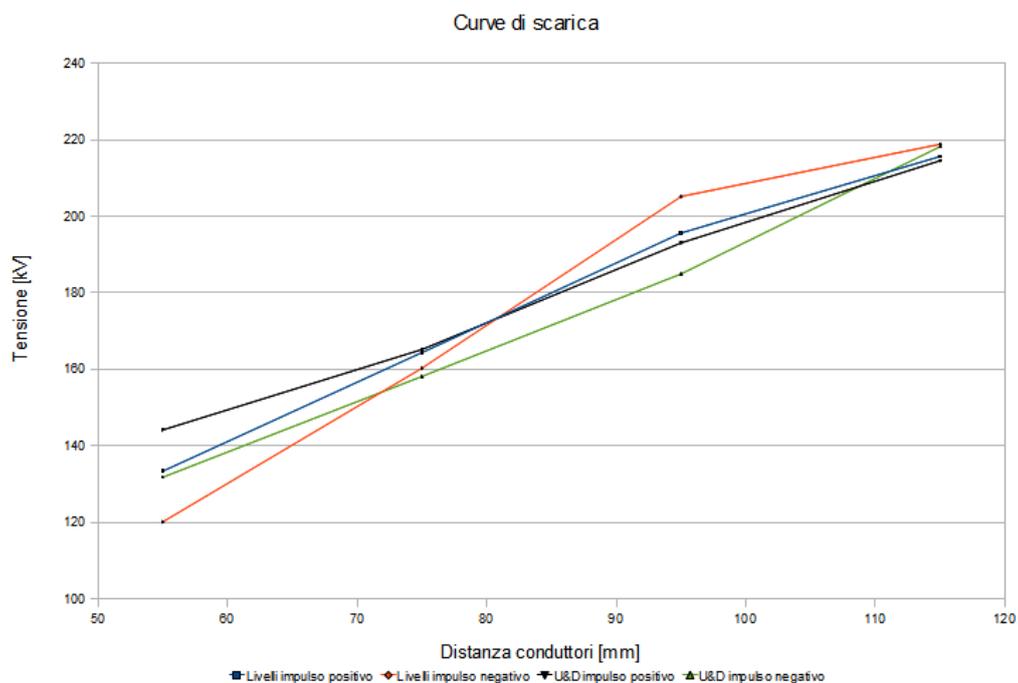


Figura 4.1: Grafico $V=f(D)$ generale

il grafico di figura 4.1 a coppie di curve per una trattazione più chiara e completa.

4.1 Curve di scarica con impulsi di tensione positivi

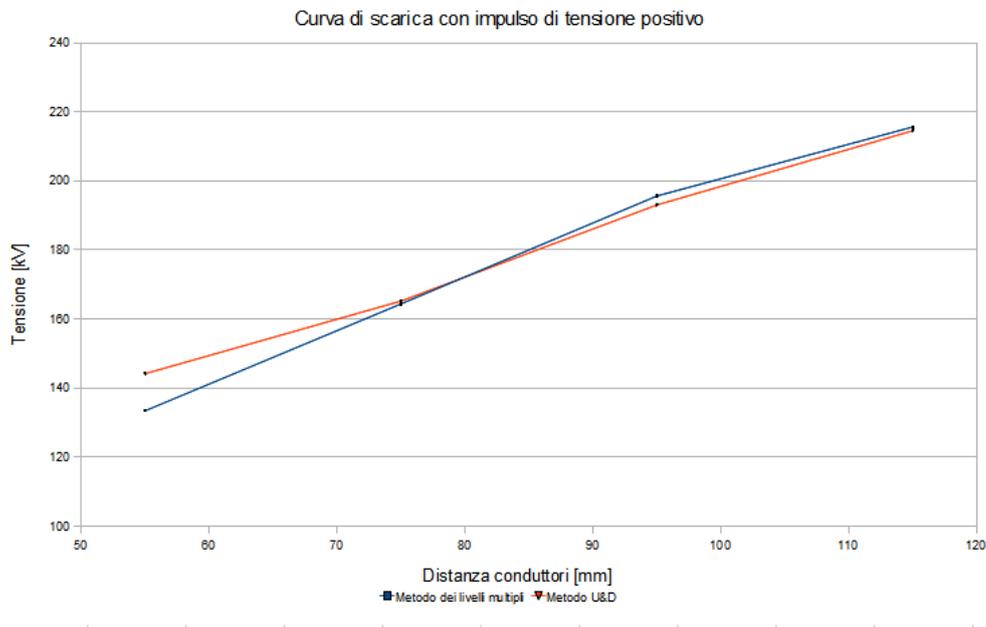


Figura 4.2: Grafico $V=f(D)$ impulso positivo

In figura 4.2 si hanno le curve ottenute con impulsi di manovra positivi e con i due metodi sperimentali utilizzati. Si osserva che queste curve hanno un andamento molto simile tra loro e ciò è corretto in quanto, nel caso più favorevole, dovrebbero sovrapporsi. Osserviamo un maggior discostamento dei grafici alla distanza $D=55mm$ infatti, come avevamo già notato nel paragrafo 3.1, c'è una differenza del 8% tra i valori. Ciò non rappresenta un buon risultato ma si sceglierà il valore più corretto tramite alcune considerazioni teoriche che verranno trattate in seguito. Con le altre configurazioni e considerando il margine di confidenza, si ottengono delle cifre attendibili

poichè si accavallano i range di U_{50} possibili. Ciò si può anche notare dalla vicinanza delle due curve.

4.2 Curve di scarica con impulsi di tensione negativi

In questo caso, osservando la figura 4.3, si nota che le curve hanno un andamento simile tra loro come descritto nel paragrafo 4.1. Osserviamo un maggior discostamento alle distanza $D=55mm$ e $D=95mm$ infatti, come descritto nei paragrafi 3.1 e 3.3, c'è una differenza rispettivamente del 10% e 9,84%. Ciò non rappresenta un buon risultato ed anche in questo caso si sceglierà il valore più opportuno tramite alcune considerazioni teoriche trattate in seguito. Con le altre configurazioni e considerando il margine di confidenza, otteniamo delle cifre attendibili. Ciò si può anche notare dalla vicinanza delle due curve.

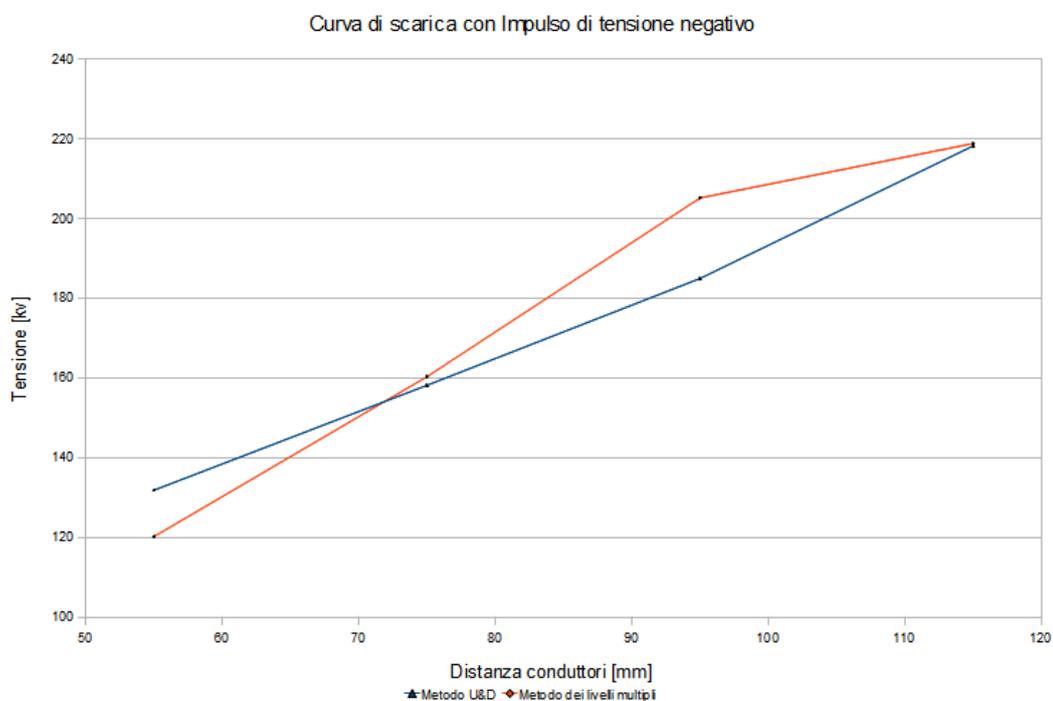


Figura 4.3: Grafico $V=f(D)$ impulso negativo

4.3 Curve di scarica metodo dei livelli multipli

Nel grafico di figura 4.4 si confronta l'andamento delle curve a seconda della polarità. Si nota come la polarità negativa abbia una tensione di scarica minore della positiva per un ampio tratto del grafico per poi superare la polarità positiva. Successivamente, all'aumentare della distanza, il divario si assottiglia.

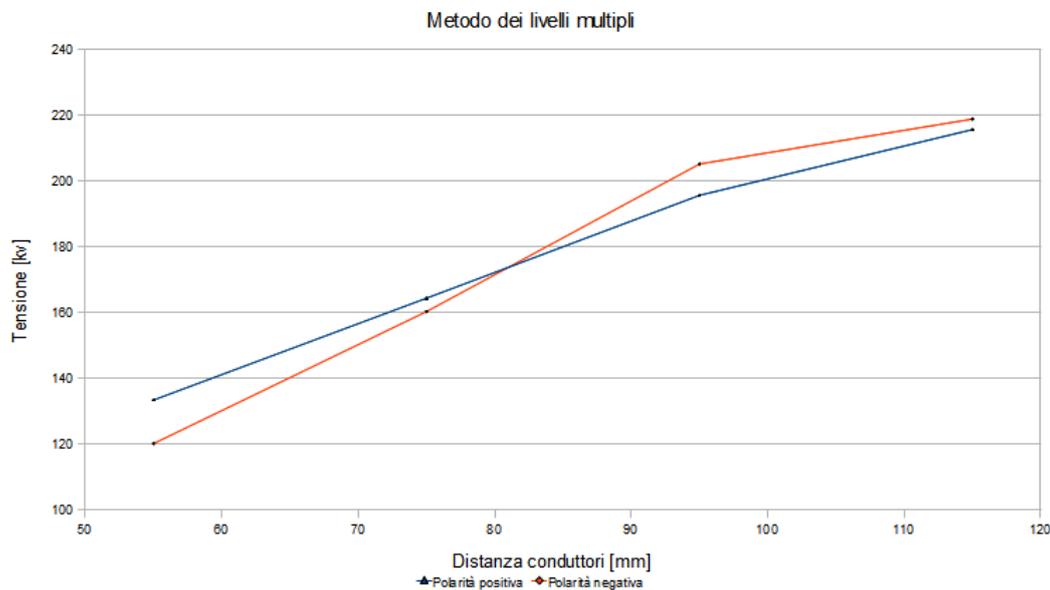


Figura 4.4: Grafico $V=f(D)$ livelli multipli

4.4 Curve di scarica metodo up-and-down

Il grafico di figura 4.5 conferma quanto detto nel paragrafo 4.3 però l'andamento differisce dalla distanza $D=95 \text{ mm}$ in quanto, in questo caso, la tensione di scarica con la polarità negativa è inferiore al caso della positiva. Valutando i dati ottenuti nel paragrafo 3.3, si osserva che la prova di classe 1 con polarità positiva presenta un intervallo di confidenza elevato, pari a

9,2 kV. Alla luce di ciò si ritiene più attendibile il valore ottenuto con il metodo up-and-down.

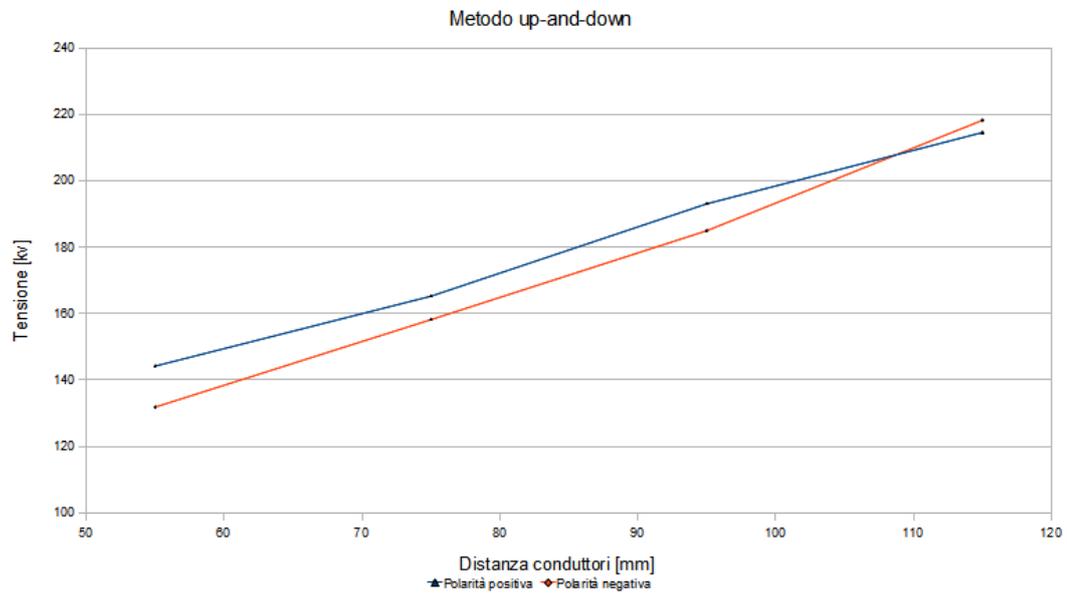


Figura 4.5: Grafico $V=f(D)$ livelli up-and-down

Conclusioni

In conclusione, utilizzando entrambi i metodi sperimentali (classe 1 e 2), si è verificata la validità e la riproducibilità delle informazioni raccolte. I valori ottenuti dalle prove sono riassunti nella tabella di figura 4.6. Poiché il dielettrico è l'aria, se si rappresenta il campo elettrico in funzione della distanza tra i conduttori, teoricamente, si ottiene un andamento iperbolico. E' sulla base di questo fatto che sono stati scelti i valori per definire la curva di scarica definitiva. Infatti quelli che più approssimano l'andamento citato in precedenza sono contrassegnati da una freccia nelle tabelle di figura 4.6. Complessivamente è possibile affermare che il metodo up-and-down è più adatto per questo tipo di ricerca, infatti tutti i valori tranne uno che andranno a creare il grafico definitivo sono delle prove di classe 2. La bontà di questo metodo si può anche osservare dagli intervalli di confidenza ottenuti, che risultano decisamente inferiori ($0,5 \div 1\% U_{50}$) e costanti rispetto alle prove di classe 1. Nel tracciare il grafico definitivo, è quindi necessario valutare i risultati ottenuti con entrambi i metodi e prendere quelli che maggiormente possono approssimare l'andamento ideale. Di seguito sono riportati i grafici che riassumono tutto lo studio svolto e tracciati con le considerazioni precedenti.

| Prova | Polarità | Distanza [mm] | U_{50} [kV] | Confidenza [kV] | Delta [%] | kV/cm |
|----------|----------|---------------|---------------|-----------------|-----------|-------|
| Classe 1 | + | 55 | 133,4 | 1,7 | 8,07 | 24,3 |
| Classe 2 | + | 55 | 144,2 | 0,8 | | 26,2 |
| Classe 1 | - | 55 | 120,2 | 0,8 | 9,68 | 21,9 |
| Classe 2 | - | 55 | 131,9 | 0,7 | | 24,0 |
| Classe 1 | + | 75 | 164,4 | 1,5 | 0,50 | 21,9 |
| Classe 2 | + | 75 | 165,2 | 0,6 | | 22,0 |
| Classe 1 | - | 75 | 160,3 | 0,6 | 1,34 | 21,4 |
| Classe 2 | - | 75 | 158,2 | 0,6 | | 21,1 |
| Prova | Polarità | Distanza [mm] | U_{50} [kV] | Confidenza [kV] | Delta [%] | kV/cm |
| Classe 1 | + | 95 | 195,7 | 9,2 | 1,32 | 20,6 |
| Classe 2 | + | 95 | 193,1 | 1,0 | | 20,3 |
| Classe 1 | - | 95 | 205,2 | 1,4 | 9,84 | 21,6 |
| Classe 2 | - | 95 | 185,0 | 0,7 | | 19,5 |
| Classe 1 | + | 115 | 215,7 | 2,4 | 0,51 | 18,8 |
| Classe 2 | + | 115 | 214,6 | 2,4 | | 18,7 |
| Classe 1 | - | 115 | 218,9 | 4,0 | 0,27 | 19,0 |
| Classe 2 | - | 115 | 218,3 | 1,5 | | 19,0 |

Figura 4.6: Tabella riassuntiva U_{50}

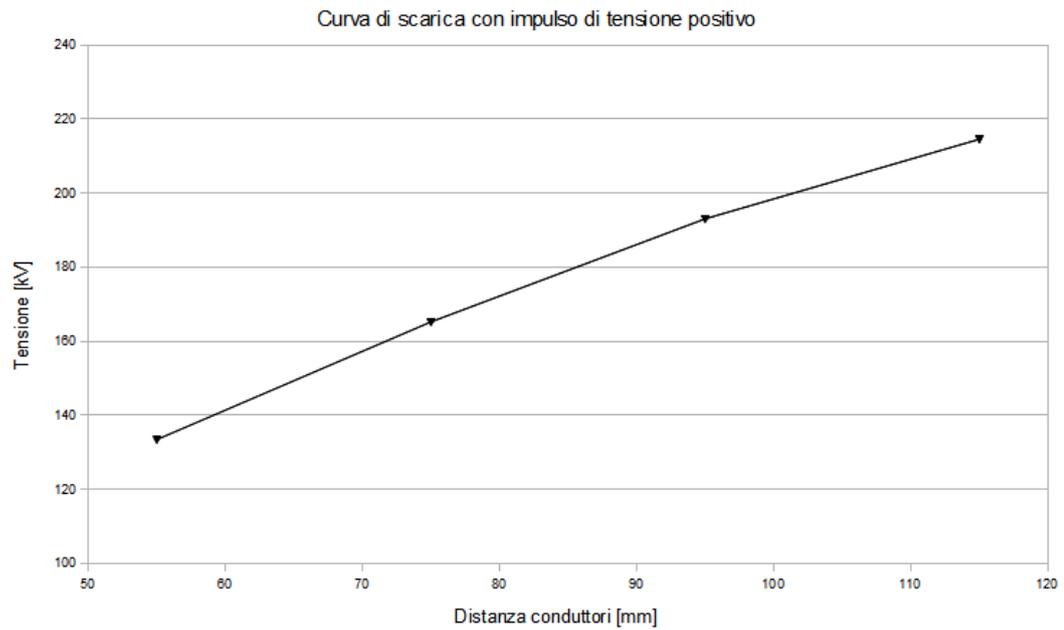


Figura 4.7: Grafico $V=f(D)$ riassuntivo polarità positiva

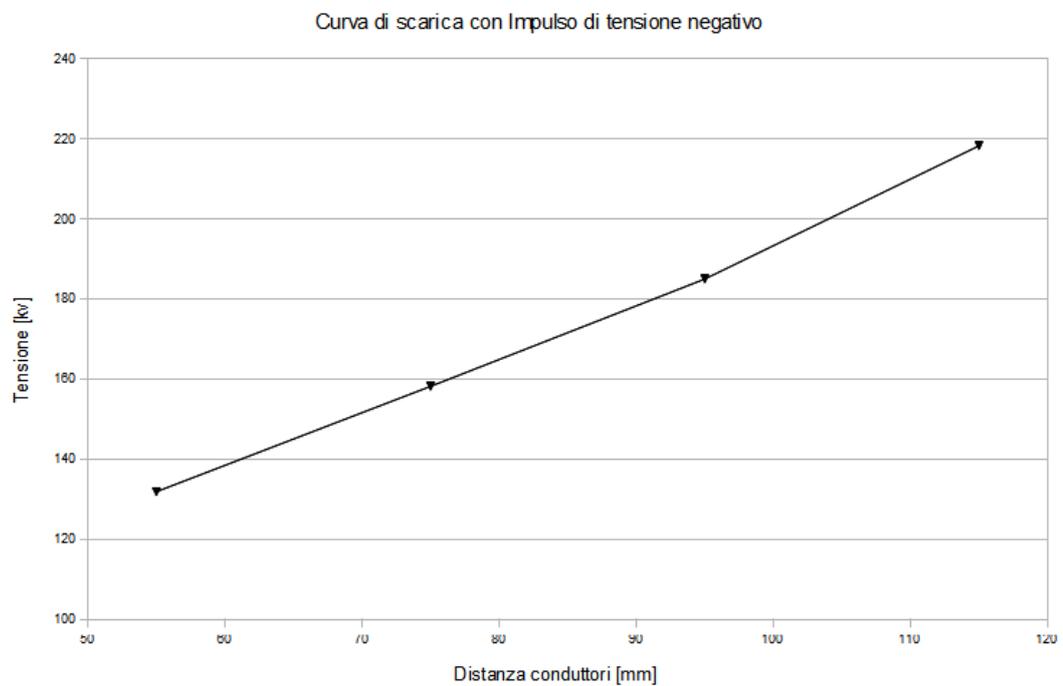


Figura 4.8: Grafico $V=f(D)$ riassuntivo polarità negativa

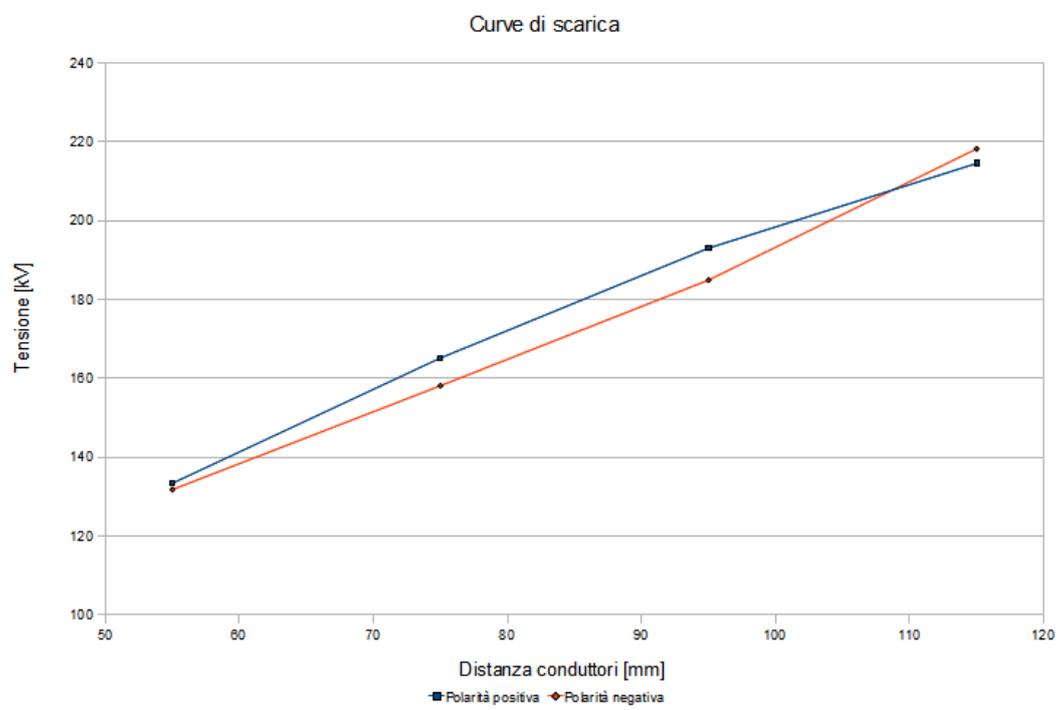


Figura 4.9: Grafico $V=f(D)$ riassuntivo

Bibliografia

- [1] CEI (1997), “CEI 42-1: Spinterometro a sfere”, seconda edizione.
- [2] CEI (1997), “CEI 42-4: Tecniche di prova ad alta tensione. Parte1: Definizioni e prescrizioni generali relative alle prove”, seconda edizione.
- [3] IEC 60060-1 (2010), “High voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements”.
- [4] J. W. Dixon and A. M. Mood (1948), “A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data”, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 43, No. 241, pp. 109-126, (Mar., 1948).
- [5] G. Carrara and W. Hauschild, “Statistical Evaluation of Dielectric Test Results”, *Study Committee 33, Electra No. 133*, pp. 109-131, 1990.
- [6] A.PEN-TUNG SAH (1927), “Studies of sparking in air”, *American Institute of Electrical Engineers*, Vol. XLVI, pp. 604-615.

