

INDICE

SOMMARIO	3
1. INTRODUZIONE	5
2. GENERALITÀ SUI MATERIALI ISOLANTI	7
2.1. MECCANISMI DI POLARIZZAZIONE.....	7
2.1.1. Permittività	7
2.1.2. Polarizzabilità	8
2.2. CONDUZIONE DEI DIELETTRICI.....	10
2.2.1. Isolanti Gassosi.....	10
2.2.2. Isolanti Liquidi	11
2.2.3. Isolanti Solidi	11
2.3. PERDITE NEI DIELETTRICI	13
2.3.1. Influenza dei parametri esterni sulle perdite dielettriche	14
2.4. DIELETTRICI DI IMPIEGO TECNICO	16
2.4.1. Dielettrici allo stato gassoso	17
2.4.2. Dielettrici allo stato liquido.....	19
2.4.3. Dielettrici allo stato solido	20
2.4.4. Interfaccia tra dielettrici di tipo diverso.....	24
3. RESINA EPOSSIDICA.....	27
3.1. CHIMICA E PROCESSO DI POLIMERIZZAZIONE.....	27
3.1.1. Caratterizzazione e importanza della Tg.....	29
3.1.2. Carattere esotermico della polimerizzazione	34
3.1.3. Additivi	35
3.2. TECNOLOGIA DI PROCESSO.....	37
3.2.1. Preparazione della miscela	37
3.2.2. Stampaggio	40
3.3. PROPRIETÀ MECCANICHE	42
3.3.1. Sollecitazione Termomeccanica.....	43
3.3.2. Double Torsion Test	44
3.4. PROPRIETÀ ELETTRICHE	45
3.4.1. Costante Dielettrica Relativa e Fattore di Perdita	45
3.4.2. Rigidità dielettrica	53
3.4.3. Resistenza al treeing	62
3.4.4. Resistività di volume e di superficie.....	66

3.4.5.	Resistenza al tracking	67
3.4.6.	Resistenza all'arco	68
4.	ISOLATORI PER AMBIENTI ESTERNI	69
4.1.	GOMMA SILICONICA	71
4.1.1.	Polimerizzazione e Idrofobicità	72
4.1.2.	Tecnologia di Processo	73
4.1.3.	Proprietà Elettriche	75
4.2.	RESINA CICLOALIFATICA	78
4.3.	RESINA IDROFOBICA.....	79
5.	ANALISI DI CAMPO ELETTRICO	83
5.1.	CENNI AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI (FEM)	85
5.1.1.	Impostazione della Simulazione	86
5.2.	GIUNZIONE PER CAVO	87
5.3.	ISOLATORI PASSAMURO.....	100
5.3.1.	Accoppiamento Capacitivo.....	101
5.3.2.	Sollecitazione elettrica sull'interfaccia resina-aria.....	104
5.4.	ISOLATORI PER IMS DA PALO	110
5.4.1.	Accoppiamento Capacitivo.....	114
5.4.2.	Intensità della Sollecitazione Elettrica	121
5.5.	TRAVERSEÉ CON TA.....	130
5.5.1.	Accoppiamento Capacitivo.....	133
5.5.2.	Valutazione dello Stress Elettrico.....	134
6.	CONCLUSIONI	141
	RINGRAZIAMENTI	143
	APPENDICE A	145
	APPENDICE B	147
	APPENDICE C	149
	BIBLIOGRAFIA	151

SOMMARIO

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è la valutazione dell'efficacia del supporto alla progettazione di isolatori per Media Tensione fornita dall'analisi di campo elettrico tramite software basati sul metodo agli elementi finiti.

La realizzazione di un buon isolatore in materiale organico non è legata solamente ad un'efficace distribuzione della sollecitazione elettrica, ma anche ad altri aspetti di carattere chimico, meccanico e di processo su cui si è reso necessario un approfondimento preliminare. Solo comprendendo a fondo il comportamento dei materiali impiegati e le criticità della produzione industriale si riconoscono i limiti dei risultati ottenuti dal post-processing del FEM, motivando le divergenze che possono manifestarsi tra la soluzione matematica e le evidenze sperimentali.

Dall'esperienza maturata durante lo stage semestrale presso *Veneta Isolatori S.p.A.* si è dimostrato come il software *COMSOL*[®] si presti molto bene ad una stima del valore di capacità fra due elettrodi e ad una valutazione del pericolo di perforazione interna dell'isolatore quando è sottoposto alle prove di tenuta a tensione impulsiva o a frequenza industriale. Se invece si desidera determinare la possibilità di scarica in aria in condizioni analoghe, l'elaborazione dei risultati si mostra più laboriosa e incerta, anche a causa dell'ancora limitata modellizzazione matematica dei processi di scarica nei gas.

1. INTRODUZIONE

I materiali organici sono largamente utilizzati come isolanti nelle apparecchiature elettromeccaniche per applicazioni di Media Tensione. La resina epossidica presenta ottime caratteristiche dielettriche e meccaniche; inoltre si presta alla realizzazione per stampaggio di isolamenti di forma complessa a costi contenuti, all'interno dei quali possono essere inglobati barre conduttrici, prese capacitive per il rilievo della presenza di tensione, trasformatori amperometrici e inserti metallici in genere. Per applicazioni in ambiente esterno sono state preparate particolari mescole epossidiche, come la cicloalifatica e l'idrofobica, anche se le migliori performances in termini di resistenza agli agenti atmosferici e di idrofobicità vengono offerte dalla gomma siliconica. Gli isolatori compositi sfruttano al meglio i pregi di questi due materiali: la resina garantisce al nucleo le adeguate prestazioni meccaniche mentre il guscio in gomma lo preserva dagli effetti dell'inquinamento atmosferico.

Le proprietà dielettriche dei materiali isolanti organici dipendono dalla composizione del sistema epossidico, oltre che dalle condizioni di temperatura, frequenza e intensità dello stress elettrico a cui vengono sottoposti in esercizio. Per ottenere componenti di qualità è di primaria importanza l'accuratezza delle fasi di preparazione della mescola, oltre alla corretta gestione di pressioni e temperature durante il processo di stampaggio dell'isolatore, al fine di evitare l'insorgere di fessurazioni e tensioni meccaniche interne, particolarmente critiche per i dispositivi isolati in esafluoruro di zolfo.

Gli isolatori possono appartenere a diverse tipologie: i *passanti* fungono da interfaccia fra due ambienti diversi e assicurano la continuità elettrica del conduttore principale con una barra di rame o alluminio inglobata nel corpo isolante; i *portanti* vengono utilizzati invece come sostegno e distanziamento delle parti in tensione. Esistono poi numerose varianti di *involucri* e *protezioni* isolanti che vengono utilizzate con finalità diverse all'interno delle apparecchiature elettriche.

Le prestazioni degli isolatori in materiale organico possono essere valutate facendo riferimento alle norme emanate dal comitato IEC TC36¹. In particolare, gli isolatori passanti devono essere sottoposti alla prova di tenuta a frequenza industriale e alla prova di tenuta ad impulso, oltre alla misura del livello di scariche parziali, secondo le indicazioni previste dalla classe di tensione di esercizio a cui appartengono. Per applicazioni da esterno possono essere previste delle prove aggiuntive che mirano a testare il comportamento del prodotto sia al fenomeno del tracking che in termini di resistenza agli agenti atmosferici.

La buona progettazione di un isolatore deve distribuire la sollecitazione elettrica in modo che il prodotto superi agevolmente tutte le prove previste dalla normativa: il raggiungimento di questo obiettivo risulta estremamente agevolato dalla possibilità di analizzare la distribuzione del campo elettrico con l'impiego di un software agli elementi finiti.

L'efficacia dell'utilizzo del software *COMSOL*[®] nello studio dello stress elettrico in condizioni elettrostatiche come supporto alla progettazione è stata valutata in collaborazione con *Veneta Isolatori S.p.A.*, azienda che da oltre trent'anni elabora e produce isolatori per applicazioni di Media Tensione in resina epossidica e gomma siliconica.

¹ *Standardization of insulators for high voltage systems and equipment including bushings, insulators for overhead lines and substations and their couplings.*

La presente tesi di laurea si articola quindi nei seguenti capitoli:

- Il Capitolo 2 presenta i principali concetti teorici sui meccanismi di polarizzazione, perdita e conduzione nei materiali isolanti, con un'attenzione particolare per le caratteristiche dei dielettrici di impiego tecnico più diffuso.
- Il Capitolo 3 approfondisce la chimica e il processo di polimerizzazione delle mescole epossidiche, esaminando i passaggi del processo produttivo industriale di stampaggio; inoltre analizza le proprietà elettriche e meccaniche di questo materiale e la loro dipendenza dalle principali grandezze d'influenza.
- Il Capitolo 4 riporta un esame delle caratteristiche essenziali dei tre più diffusi materiali per la realizzazione di isolatori da esterno, ovvero gomma siliconica, resina cicloalifatica e resina idrofobica.
- Il Capitolo 5 illustra quattro casi pratici di progettazione assistita dall'utilizzo del software *COMSOL*[®], seguita dalla validazione sperimentale dei risultati ottenuti.

2. GENERALITÀ SUI MATERIALI ISOLANTI

2.1. MECCANISMI DI POLARIZZAZIONE

Col termine “dielettrico” si intende generalmente un materiale in cui, sotto l’azione del campo elettrico, è prevalente il *posizionamento* rispetto al *moto medio* delle cariche. In altri termini sono prevalenti, ma non esclusivi, i fenomeni di polarizzazione rispetto a quelli di conduzione. [1] In particolare un materiale è classificato come “dielettrico” se ha l’abilità di immagazzinare energia quando viene sottoposto ad un campo elettrico.

La *polarizzazione* è il fenomeno per cui l’applicazione di un campo elettrico esterno provoca lo spostamento delle cariche elettriche interne al materiale, le quali formano dei dipoli elettrici microscopici. La presenza di tali dipoli fa sì che il campo elettrico all’interno del dielettrico sia dato dalla risultante del campo elettrico esterno, polarizzante, e di quello generato dalle cariche di polarizzazione.

Nelle equazioni di Maxwell si tiene conto della presenza di questo campo elettrico aggiuntivo attraverso la definizione del vettore *induzione elettrica*:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.1)$$

dove:

- \mathbf{E} è il campo elettrico applicato esternamente rispetto al materiale
- ε è il coefficiente chiamato *permittività*, esso caratterizza il comportamento del materiale nei confronti della polarizzazione e ne quantifica la tendenza a contrastare l’intensità del campo elettrico presente al suo interno
- $\varepsilon_0 = 8.85418781762 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ è la costante dielettrica del vuoto
- \mathbf{P} è il vettore *intensità di polarizzazione* e rappresenta la reazione della materia all’applicazione del campo elettrico.

2.1.1. Permittività

La permittività elettrica si modifica a seconda dell’orientamento del campo elettrico rispetto al campione in esame ed è quindi rappresentata propriamente da un tensore, il quale ne fornisce una descrizione locale in funzione delle coordinate del punto, indipendentemente dal sistema di riferimento scelto. Se si ha a che fare con un materiale lineare, omogeneo e isotropo tutte le componenti del tensore hanno lo stesso valore, perciò la permittività può essere trattata come una grandezza scalare e prende il nome di *costante dielettrica*.

La relazione fra ε ed ε_0 definisce la *costante dielettrica relativa*:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

Se invece il materiale non è omogeneo, lineare ed isotropo, la permittività dipende da altri fattori come la posizione all’interno del mezzo, la temperatura o la frequenza del campo applicato. In particolare, se il materiale è omogeneo ma anisotropo ε diventa una matrice, se non è omogeneo i coefficienti di tale matrice sono funzione della posizione, se non è lineare la costante dielettrica dipende dal campo elettrico e in generale anche dal tempo.

Il comportamento di un dielettrico reale rispetto all’applicazione di un campo elettrico esterno di tipo alternato dipende anche dalla frequenza: questa dipendenza tiene conto del fatto che la polarizzazione di un materiale reale non avviene istantaneamente rispetto all’applicazione del campo elettrico, ma con un certo ritardo che può essere rappresentato come una differenza di fase fra il fasore dello spostamento elettrico $\bar{\mathbf{D}}$ e quello del campo

elettrico \bar{E} . Per questo motivo la permittività è spesso trattata come una funzione complessa della frequenza angolare del campo elettrico applicato:

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

$$D(t) = D_0 \cos(\omega t - \varphi) = D_1 \cos(\omega t - \varphi) + D_2 \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.4)$$

Traducendo le espressioni in termini fasoriali:

$$E(t) \rightarrow \dot{E} \quad (2.5)$$

$$D(t) \rightarrow \dot{D} = D e^{-j\varphi} = D_1 - jD_2 = \dot{\epsilon} \dot{E} \quad (2.6)$$

Si può quindi introdurre la *costante dielettrica complessa*:

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} = \dot{\epsilon} \bar{E} = (\epsilon' - j\epsilon'') \bar{E} \quad (2.7)$$

Si può osservare che:

- Il coefficiente immaginario della costante dielettrica complessa tende a zero al tendere a zero della frequenza ed è legato all'*energia dissipata* nel dielettrico

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \epsilon''(\omega) = 0$$

- Il valore limite a bassa frequenza della parte reale della costante dielettrica coincide con il valore di costante dielettrica valutata in condizioni stazionarie ed è legato all'*energia immagazzinata* nel dielettrico

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \epsilon'(\omega) = \epsilon_{staz}$$

2.1.2. Polarizzabilità

Il coefficiente che lega il vettore P al campo E viene chiamato *suscettività dielettrica* e si definisce come:

$$\chi_e = \frac{P}{\epsilon_0 E} = \epsilon_r - 1 \quad (2.8)$$

Il fenomeno della polarizzazione si può interpretare come la risultante degli effetti dei momenti di dipolo elementari che compaiono in ogni atomo o molecola in seguito all'applicazione di un campo elettrico μ_{el} . L'intensità di tali momenti è proporzionale a quella del campo stesso secondo il *coefficiente di polarizzabilità*:

$$\mu_{el} = \alpha \cdot E \quad (2.9)$$

Se consideriamo N atomi o molecole nell'unità di volume si ha:

$$P = N \mu_{el} = N \alpha E \quad (2.10)$$

Il valore del coefficiente α risulta essere la somma dei diversi tipi di polarizzazione esaminati nei paragrafi seguenti.

$$\alpha = \alpha_{el} + \alpha_{io} + \alpha_{dp} + \alpha_{int} \quad (2.11)$$

- **Polarizzazione elettronica**

Nell'atomo, in assenza di campo elettrico esterno, si può ritenere che il baricentro delle cariche negative (elettroni) coincida con il baricentro delle cariche positive (nucleo). In presenza di un campo elettrico esterno, invece, si ha una deformazione elastica ed istantanea

dell'atomo stesso, il quale assume un momento elettrico dipendente dal campo, ma non dalla temperatura né dalla frequenza della sollecitazione (per le frequenze tipiche delle applicazioni elettriche).

In questo caso il fattore di polarizzazione dipende solo dalla dimensione dell'atomo e non dal numero atomico:

$$\alpha_{el} = 4\pi\epsilon_0 R^3 \quad (2.12)$$

- **Polarizzazione atomica o ionica**

In una molecola a struttura simmetrica, in assenza di campo elettrico esterno, si può ritenere che il baricentro degli ioni negativi coincida con quello degli ioni positivi; quindi il momento di dipolo è nullo (molecola non polare). In presenza di campo elettrico si ha una deformazione elastica istantanea della molecola che assume un momento di dipolo dipendente dal campo, ma non dalla temperatura né dalla frequenza della sollecitazione applicata (per le frequenze tipiche delle applicazioni elettriche).

In questo caso il fattore di polarizzazione dipende dall'energia di legame W :

$$\alpha_{io} = \frac{n e^2}{W} \quad (2.13)$$

- **Polarizzazione dipolare**

In una molecola a struttura dissimmetrica, anche in assenza di campo elettrico esterno, il baricentro degli ioni negativi *non* coincide con il baricentro degli ioni positivi; quindi il momento del singolo dipolo non è nullo, ma statisticamente compensato (molecola polare). In presenza di campo elettrico si ha pertanto un orientamento della molecola, la quale assume un momento elettrico dipendente dalla temperatura, dall'intensità del campo e dalla sua frequenza.

In questo caso nel fattore di polarizzazione occorre tener conto anche dell'agitazione termica:

$$\alpha_{dp} = \frac{\mu_{intr}^2}{3KT} \quad (2.14)$$

dove μ_{intr} è il momento di dipolo intrinseco, K è la costante di Boltzmann e T è la temperatura in kelvin.

- **Polarizzazione interfacciale**

Questo tipo di polarizzazione deriva da movimenti macroscopici di ioni (impurezze) dentro il materiale. Se quest'ultimo è caratterizzato da una certa eterogeneità dovuta a varie cause, come la presenza di una fase cristallina e di una fase amorfa, oppure alla presenza di particelle estranee che fungono da riempitivi, allora gli ioni tendono ad accumularsi alle interfacce fra le varie fasi presenti assumendo una posizione tale da minimizzare l'energia elettrostatica e quindi contribuiscono notevolmente all'aumento della costante dielettrica.

- **Tempo di rilassamento**

All'annullamento istantaneo del campo elettrico applicato si osserva che la polarizzazione non si riduce a zero istantaneamente, ma secondo la relazione temporale:

$$P(t) = P_0 e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (2.15)$$

dove ϑ è detto *tempo di rilassamento*. Esso è inversamente proporzionale rispetto alla temperatura ed è diverso per i quattro tipi di polarizzazione che sono stati precedentemente discussi.

Per quanto riguarda la polarizzazione elettronica, gli elettroni hanno una massa talmente piccola che il loro moto può seguire le variazioni del campo elettrico applicato fino a frequenze molto elevate, a cui corrisponde un tempo di rilassamento dell'ordine di 10^{-16} s. I movimenti associati alla polarizzazione atomica si svolgono in tempi dell'ordine di 10^{-13} s, quelli della polarizzazione dipolare in 10^{-9} s, quelli della polarizzazione interfacciale sono dell'ordine di 10^{-2} ÷ 10^{-3} s.

2.2. CONDUZIONE DEI DIELETTICI

2.2.1. Isolanti Gassosi

I gas hanno valori di conducibilità elettrica molto bassi, dipendenti soprattutto dalla presenza di cariche libere prodotte da cause esterne come raggi X, radiazioni ultraviolette, radiazioni nucleari e raggi cosmici.

La presenza di un campo elettrico esterno determina l'accelerazione di tali cariche libere, le quali possono acquisire energia sufficiente a eccitare o ionizzare le molecole neutre con cui vengono in collisione, aumentando quindi il valore di conducibilità del gas.

All'aumento del numero di elettroni liberi concorre anche l'innalzamento della temperatura che fa aumentare l'agitazione termica e di conseguenza l'energia dei portatori di carica, rendendo più probabile la ionizzazione delle particelle neutre con cui essi collidono.

In questo contesto, è doveroso tenere in considerazione anche il fenomeno della *fotoionizzazione*: quando un elettrone collide con una molecola neutra ma non possiede l'energia sufficiente a ionizzarla, decade in tempi brevissimi emettendo luce; i fotoni così prodotti possono ionizzare, in un secondo momento, altri elementi della miscela che hanno energia di ionizzazione più bassa.

Per affrontare il meccanismo di conduzione nei gas in maniera completa, si devono considerare anche i processi che portano ad una riduzione del numero di cariche libere, come la *ricombinazione* e l'*attaccamento*. Nel primo caso la carica libera dell'elettrone viene neutralizzata dalla collisione con una particella di carica opposta, mentre nel secondo caso la carica dell'elettrone si mantiene inalterata ma, legandosi ad uno ione, riduce drasticamente la mobilità ad essa associata.

Il grafico di Fig.2.1 mostra la caratteristica tensione-corrente nei gas:

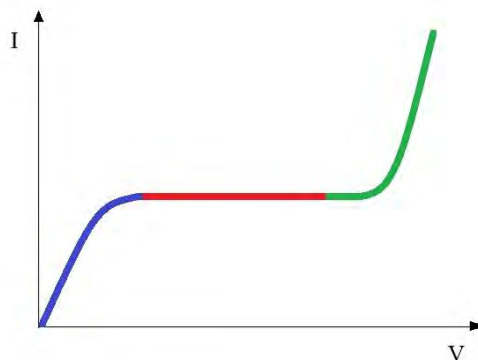


Fig. 2.1 Relazione fra tensione e corrente di conduzione in un gas

- **ZONA BLU:** fintantoché l'intensità del campo elettrico è debole, il numero di cariche agli elettrodi è trascurabile rispetto a quelle prodotte perché prevale l'effetto della ricombinazione.
- **ZONA ROSSA:** l'intensità del campo è sufficientemente elevata da far sì che le cariche prodotte dalle cause esterne vengano drenate rapidamente verso gli elettrodi; in questo modo il loro tempo di permanenza nello spazio interelettrodo è troppo breve perché si abbia un effetto apprezzabile della ricombinazione.
- **ZONA VERDE:** al di sopra di una certa intensità di campo elettrico applicato la corrente risulta indipendente dal campo stesso e si verifica la scarica elettrica.

2.2.2. Isolanti Liquidi

La conduzione dei liquidi (quindi il valore di resistività²) è fortemente condizionata dal grado di purezza e dalle condizioni di esercizio.

Innanzitutto la conducibilità di un dielettrico liquido aumenta sensibilmente qualora vi siano dissociate delle impurezze, compresa l'acqua contenuta come umidità dell'aria con cui esso viene in contatto. La resistività può aumentare anche per effetto del prolungato passaggio di una corrente continua: le particelle cariche vengono raccolte agli elettrodi e la loro concentrazione nel liquido diminuisce. Ad ogni modo il fattore che influenza maggiormente la conducibilità di un dielettrico liquido è la temperatura: un suo aumento provoca sia una riduzione di viscosità, quindi un aumento di mobilità degli ioni, che un aumento del grado di dissociazione, quindi del numero di cariche libere.

Il grafico di Fig.2.2 mostra la caratteristica tensione-corrente nei gas:

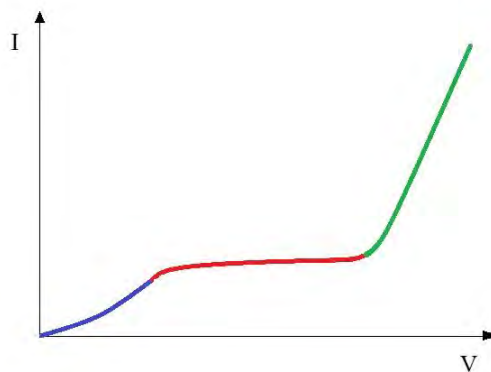


Fig. 2.2 Caratteristica tensione-corrente in un liquido

- **ZONA BLU:** a bassi valori di campo elettrico, la conduzione è essenzialmente di tipo ionico e la corrente cresce al crescere della tensione per l'aumento della velocità di drift degli ioni.
- **ZONA ROSSA:** a valori intermedi di campo si raggiunge una saturazione dovuta all'uguaglianza fra il tasso di dissociazione e formazione di ioni ed il tasso di assorbimento agli elettrodi.
- **ZONA VERDE:** a campi più elevati la corrente aumenta con pendenza molto elevata per effetto dell'emissione di elettroni da parte del catodo, fino a che non si verifica la scarica.

2.2.3. Isolanti Solidi

La conduzione nei dielettrici solidi è fondamentalmente di tipo ionico ed elettronico. [2]

² Si definisce *resistività* l'inverso della conducibilità: $\rho = \frac{1}{\gamma}$ [Ωm]

Tutti i solidi posseggono un numero elevato di bande energetiche (teoricamente un numero infinito, così come in teoria un atomo può avere infiniti orbitali) ma solo poche di esse sono “compatibili”, ovvero hanno energia abbastanza moderata da trattenere gli elettroni nel solido. Inoltre ci possono essere degli intervalli di valori energetici a cui non corrisponde alcun orbitale, indipendentemente dal numero pur elevato degli atomi legati nella struttura solida: essi vengono chiamati *gap energetici* o *livelli proibiti*.

Le bande possono avere ampiezza variabile. È detta *banda di valenza* quella quasi completamente occupata da elettroni caratterizzati da mobilità trascurabile, dovuta alla loro funzione di mantenere legati gli atomi fra loro orbitando attorno a due nuclei adiacenti. Nella banda superiore detta *banda di conduzione* la concentrazione di elettroni è minore ma essi sono meno legati ai nuclei e sono liberi di muoversi in seguito all’applicazione di un campo elettrico. La banda di conduzione ha energia superiore rispetto alla banda di valenza.

Nei conduttori elettrici la banda di valenza e quella di conduzione si sovrappongono determinando un’unica banda più ampia (Fig.2.3); ciò significa che gli elettroni di valenza sono legati al nucleo così debolmente da avere la stessa mobilità degli elettroni di conduzione e quindi, in presenza di una differenza di potenziale, possono contribuire alla corrente elettrica. Negli isolanti elettrici invece, la banda di valenza e quella di conduzione sono separate da un gap energetico piuttosto rilevante (Fig.2.3). In generale la conducibilità di un materiale è direttamente proporzionale alla concentrazione di elettroni nella banda di valenza.

Nei materiali isolanti la banda di valenza e quella di conduzione sono separate da un gap energetico molto elevato (Fig.2.3), dell’ordine di qualche eV per mole di elettroni, per cui gli elettroni che riempiono la banda di valenza non possono accedere a livelli energetici superiori.

Nei semiconduttori il gap energetico proibito è più ridotto rispetto a quello degli isolanti (Fig.2.3), quindi è più facile che gli elettroni vengano promossi dalla banda di valenza a quella di conduzione se ad essi viene trasferita energia.

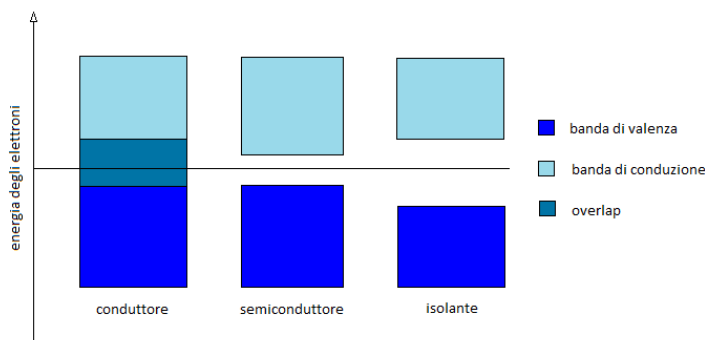


Fig. 2.3 schema semplificato della struttura elettronica a bande

Negli isolanti cristallini perfetti, a temperatura assoluta zero, la conducibilità elettronica è nulla sia perché non esistono elettroni in banda di conduzione, sia perché non esistono lacune in banda di valenza.

Negli isolanti reali le imperfezioni della struttura cristallina e la presenza di atomi di natura diversa danno luogo a livelli energetici permessi all’interno della banda proibita. In tali condizioni una temperatura diversa dallo zero assoluto consente ad un certo numero di elettroni di avere energia sufficiente a passare in banda di conduzione in maniera diretta, oppure passando attraverso i livelli intermedi introdotti dalle imperfezioni.

Sia la densità che la mobilità sono dipendenti dalla temperatura e la conducibilità, almeno in campi elettrici bassi, può essere espressa da:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\left(\frac{\phi}{KT}\right)} \quad (2.16)$$

dove K è la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta, γ_0 e ϕ sono costanti in un fissato campo di temperatura.

All'aumentare del campo elettrico applicato sia la mobilità che la densità di cariche possono aumentare, comportando un aumento della conducibilità.

Nel caso di materiali solidi si deve tenere presente che ci sono due distinte modalità di conduzione della corrente, una entro il volume e una sulla superficie; per questo si fa riferimento a due distinti valori di *resistività*.

- **Resistività di volume**

La resistività di volume è definibile come la resistenza di un cubo di materiale di lato unitario, calcolata fra due facce opposte del cubo in condizioni di distribuzione uniforme della corrente.

Per le sostanze cristalline che manifestano un comportamento anisotropo la resistività di volume dipende anche dalla direzione del campo elettrico applicato. Inoltre è possibile distinguere una conducibilità intrinseca del materiale dai contributi dovuti alle impurezze, i quali fanno sentire il proprio effetto a temperature più basse.

È infine da osservare che per campi elettrici sufficientemente elevati e prossimi alla scarica, la conducibilità dipende anche dal modulo del campo elettrico applicato.

- **Resistività superficiale**

La resistività superficiale è invece pari alla resistenza di un lembo di superficie di forma quadrata, di qualsiasi dimensione, quando la corrente circola fra due lati opposti del quadrato stesso.

La conduzione lungo la superficie di un dielettrico solido deriva sostanzialmente dal fatto che sulla superficie si deposita dell'umidità o per condensazione o per adsorbimento. Nel caso della *condensazione* è l'acqua stessa a determinare la conduzione e tale effetto viene amplificato se essa porta in soluzione molecole di altre sostanze contaminanti. L'*adsorbimento* consiste invece nello stabilirsi di legami chimici tra le molecole d'acqua e gli atomi superficiali del solido i cui legami non sono completati: si forma in tal modo un film che aderisce fortemente alla superficie del dielettrico e che costituisce il supporto per il movimento di ioni messi a disposizione del dielettrico stesso.

Dagli aspetti appena messi in luce, si evince che la resistività superficiale dipende dall'umidità relativa del mezzo circostante e dalla natura dei materiali dielettrici stessi, i quali possono essere divisi in materiali idrorepellenti, idrofili e porosi.

2.3. PERDITE NEI DIELETTRICI

I dielettrici sono sede di dissipazione di energia. Le perdite possono essere distinte principalmente in due categorie: [3]

- a) Perdite per *polarizzazione*: (indicate anche come *perdite di isteresi dielettrica*) corrispondono ai diversi fenomeni di polarizzazione, ossia alla rotazione e deformazione delle molecole stesse. Queste perdite sono particolarmente pronunciate in corrispondenza di determinate frequenze del campo elettrico applicato, mentre risultano nulle quando il campo elettrico è continuo.

- b) Perdite per *conduzione*: risultano proporzionali al quadrato del campo applicato e inversamente proporzionali alla resistività del materiale; si presentano sia con tensione continua che con tensione alternata. Queste perdite sono legate alla migrazione delle cariche all'interno del materiale: infatti un dielettrico reale ha una resistività molto elevata, ma finita ($10^9 \div 10^{16} \Omega\text{m}$), perciò in presenza di un campo elettrico esso è percorso da corrente e questo determina delle perdite non trascurabili.

Di queste perdite si dà una misura relativa: se la tensione applicata varia nel tempo con legge sinusoidale, la potenza dissipata P_d viene riferita alla potenza messa in gioco dal dielettrico, ovvero alla potenza reattiva Q .

Il dielettrico può essere schematizzato come un bipolo RC parallelo nel quale la componente ohmica R percorsa dalla corrente $I \cos \varphi$ dà ragione della dissipazione di energia e la componente C percorsa dalla corrente $I \sin \varphi$ evidenzia i fenomeni di natura capacitiva a cui è associata la potenza reattiva.

Quando il dielettrico è sottoposto ad una tensione sinusoidale di valore efficace V e di frequenza $f = \omega/2\pi$, la relazione fra tensione e corrente è rappresentata dal diagramma fasoriale di Fig.2.4.

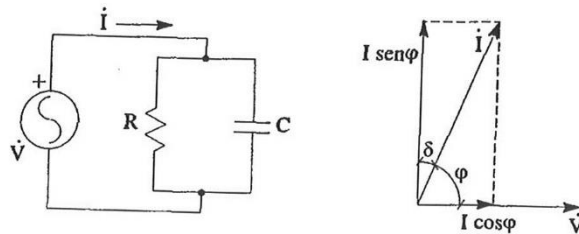


Fig. 2.4 rappresentazione circuitale di un dielettrico sede di perdite e relativo diagramma fasoriale

La componente della corrente in fase con la tensione è responsabile della dissipazione della potenza attiva:

$$P_d = V I \cos \varphi = V I \sin \delta \quad (2.17)$$

Alla componente in quadratura è associata la potenza reattiva:

$$Q = V I \sin \varphi = V I \cos \delta = \omega C V^2 \quad (2.18)$$

Perciò il *fattore di dissipazione* $\tan \delta$ sarà determinato da:

$$\tan \delta = \frac{P_d}{Q} = \frac{P_d}{\omega C V^2} \quad (2.19)$$

da cui si può agevolmente ricavare l'*angolo di perdita* δ .

Il contributo resistivo e le perdite ad esso associate sono tanto maggiori quanto più il fattore di dissipazione è elevato.

2.3.1. Influenza dei parametri esterni sulle perdite dielettriche

- **Temperatura**

La dipendenza del fattore di dissipazione dalla temperatura è mostrata in Fig.2.5

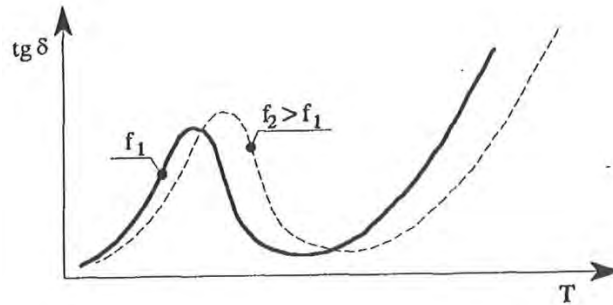


Fig. 2.5 variazione del fattore di dissipazione con la temperatura

Il primo massimo corrisponde all'effetto delle perdite per polarizzazione, mentre il successivo rapido aumento corrisponde alle perdite per conduzione che, oltre certi valori di temperatura, diventano molto elevate in accordo con la crescita della conducibilità.

Nel caso in cui il dielettrico sia *composito*, cioè sia realizzato con mezzi differenti, l'andamento del fattore di dissipazione risulta combinazione degli andamenti dovuti ai diversi componenti.

- **Frequenza**

Consideriamo la configurazione del condensatore piano in cui viene impiegato un dielettrico non ideale, il cui comportamento è influenzato dalla frequenza della sollecitazione applicata.

La potenza dissipata per unità di volume vale:

$$p = \frac{P}{\tau} = \frac{Q \tan \delta}{\tau} = \frac{\omega C V^2 \tan \delta}{\tau} = \frac{\omega \varepsilon' \frac{S}{d} (Ed)^2 \tan \delta}{Sd} = \omega \varepsilon' E^2 \tan \delta = \omega \varepsilon'' E^2 \quad (2.20)$$

$$\leftrightarrow \varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta$$

Le perdite per isteresi dielettrica sono quindi proporzionali alla frequenza e al prodotto fra la costante dielettrica propria e il fattore di perdita.

In presenza anche di fenomeni conduttivi, la potenza dissipata per unità di volume vale:

$$p = \sigma E^2 + \omega \varepsilon' E^2 \tan \delta = \sigma E^2 + \omega \varepsilon'' E^2 = \omega E^2 \left(\frac{\sigma}{\omega} + \varepsilon'' \right) = \varepsilon_p \omega E^2 \quad (2.21)$$

Quindi sia le perdite per conduzione che le perdite per isteresi dielettrica possono essere inquadrate nella costante dielettrica complessa, in cui però il coefficiente immaginario deve contenere anche un termine dipendente dalla frequenza che risulta trascurabile solo a valori prossimi all'ultravioletto:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \varepsilon_p = \varepsilon' - j \left(\frac{\sigma}{\omega} + \varepsilon'' \right) \quad (2.22)$$

Può allora essere definito un fattore di dissipazione *globale*: [1]

$$\tan \delta^* = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon'} = \frac{\frac{\sigma}{\omega} + \varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.23)$$

Complessivamente il fattore di dissipazione varia in funzione della frequenza secondo l'andamento qualitativamente mostrato in Fig.2.6.

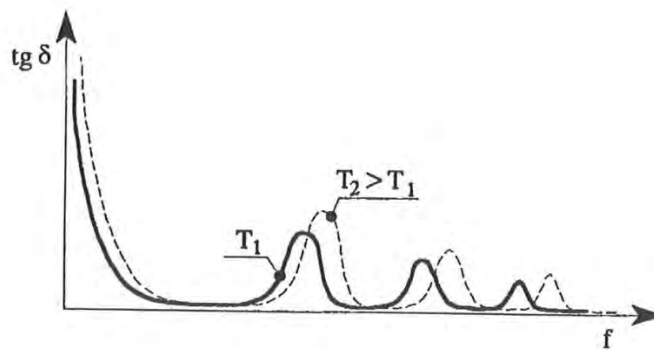


Fig. 2.6 variazione del fattore di dissipazione con la frequenza

Le perdite per conduzione, presenti anche con campi costanti nel tempo, rimangono costanti all'aumentare della frequenza e di conseguenza il loro contributo a $\tan \delta$ va progressivamente riducendosi. Esprimendo tali perdite come $P_d = V^2/R$ dalla Eq.2.18 si ottiene:

$$\tan \delta_{\text{conduzione}} = \frac{1}{\omega RC} \propto \frac{1}{f \epsilon \rho} \quad (2.24)$$

Il fattore di dissipazione presenta un massimo ogni volta che la frequenza del campo elettrico applicato si avvicina all'inverso del tempo di rilassamento tipico di un dato meccanismo di polarizzazione: nell'ordine compaiono i massimi legati alla polarizzazione dipolare, atomica ed elettronica.

- **Tensione**

Le perdite per conduzione e per polarizzazione non dipendono dalla tensione a cui è sottoposto il dielettrico. Tuttavia c'è una terza fonte di perdite che finora non è stata considerata e che consiste nei *fenomeni di ionizzazione*: essi si manifestano quando il campo elettrico è tale da provocare dei fenomeni di scarica che interessano solo alcune porzioni del volume del dielettrico (effetto corona, scariche parziali).

Fissate la frequenza e la temperatura, la dipendenza del fattore di dissipazione dalla tensione è rappresentata dalla Fig.2.7.

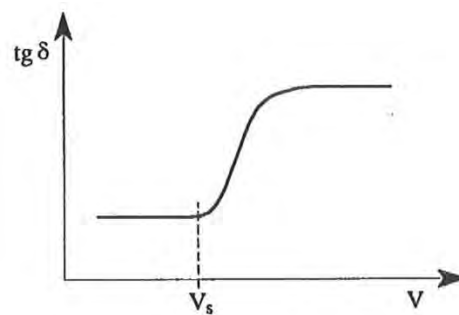


Fig. 2.7 variazione del fattore di dissipazione con la tensione

2.4. DIELETTICI DI IMPIEGO TECNICO

La necessità di un isolamento elettrico si manifesta ogni qualvolta ci siano due o più parti conduttrici, relativamente vicine fra loro, che in condizioni di normal funzionamento si trovano a valori di tensione diversi.

In molte applicazioni tecniche, il materiale isolante non deve solo essere in grado di sopportare campi elettrici elevati, ma deve anche avere le caratteristiche idonee per

resistere a determinate sollecitazioni termiche nonché a stress meccanici di varia natura: dilatazione dei materiali conduttori per effetto del calore, sforzi elettrodinamici dovuti alle sovracorrenti, vibrazioni dovute alle parti in movimento.

Un materiale dielettrico deve quindi avere in primis un elevato valore di rigidità dielettrica³, preferibilmente accompagnato da una buona resistenza al calore e completato – nel caso di isolanti solidi – da una serie di requisiti meccanici come resistenza agli sforzi, sufficiente elasticità, resistenza all’abrasione, adesione al rame ed ai metalli in genere.

Nella caratterizzazione di un materiale dielettrico occorre valutare anche la sua capacità a recuperare le proprie caratteristiche di isolamento in seguito ad un episodio di collasso parziale o totale. I dielettrici gassosi si prestano a questo recupero molto meglio dei dielettrici liquidi, mentre il comportamento autoripristinante è da escludere per la quasi totalità dei dielettrici solidi interessati da fenomeni di scarica.

Fra le caratteristiche di un buon isolante c’è anche l’elevata stabilità chimica e una certa inattaccabilità rispetto ai prodotti della ionizzazione: ciò permette di conseguire complessivamente una durata di vita sufficientemente elevata.

Da un punto di vista industriale i materiali dielettrici dovrebbero permettere la realizzazione dell’isolamento senza eccessive difficoltà o lunghi tempi di lavorazione, a costi relativamente contenuti.

2.4.1. Dielettrici allo stato gassoso

- **Aria**

L’aria a pressione atmosferica è il gas isolante più largamente utilizzato, in quanto rappresenta la quasi totalità dei sistemi di isolamento esterno.

Il primo aspetto che condiziona il suo comportamento dielettrico è il grado di uniformità della distribuzione del campo elettrico, strettamente legato alla geometria degli elettrodi. Nel caso degli isolamenti esterni di sistemi in alta tensione – ad esempio le linee aeree – le distanze di isolamento possono risultare di diversi metri, quindi la realizzazione di una distribuzione uniforme è praticamente impossibile e si ha una riduzione della rigidità dielettrica dell’aria da 30kV/cm a 5kV/cm.



Fig. 2.8 isolamento esterno in aria libera

³ la *rigidità dielettrica* è definita come il valore limite di campo elettrico oltre il quale si manifesta una conduzione di elettricità attraverso il materiale isolante. È espresso generalmente in kV/mm e dipende, oltre dal tipo di materiale, anche dalle caratteristiche del campo elettrico e dalle condizioni ambientali.

Le caratteristiche dell'aria come isolante dipendono anche dalle condizioni atmosferiche, come temperatura, pressione e umidità. È noto che valori elevati di pressione e basse temperature aumentano la densità dell'aria e quindi ne migliorano le caratteristiche dielettriche. Parimenti l'aumento della presenza di acqua in fase vapore favorisce la tenuta dell'isolamento: infatti le molecole di H₂O sono fortemente elettronegative, quindi tendono a "catturare" le cariche libere inibendo i fenomeni di conduzione.

Il valore della tensione di scarica dell'aria viene convenzionalmente espresso facendo riferimento alle condizioni standard:

- Temperatura: $T_0 = 293\text{K} = 20^\circ\text{C}$
- Pressione: $p_0 = 101.3\text{kPa}$
- Umidità assoluta: $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

tuttavia può essere riportato agevolmente alle effettive condizioni di funzionamento moltiplicandolo per i fattori di correzione:

- Densità: $\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}$
- Umidità assoluta: $k = 1 + \alpha \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right)$
(α dipende dalla forma d'onda di tensione)

Quando il campo elettrico a cui è sottoposto l'isolamento in aria è molto disuniforme la sua tenuta dielettrica è influenzata anche dalla tipologia di tensione applicata: in una tale configurazione, l'applicazione più critica – ovvero quella con tensione di scarica più bassa – risulta essere quella di una tensione con polarità positiva e forma d'onda impulsiva a fronte lungo.

- **Esafluoruro di zolfo – SF₆**

All'aumentare delle tensioni di esercizio dei sistemi elettrici, le dimensioni degli isolamenti in aria libera diventano sempre più grandi e le distribuzioni del campo elettrico sono necessariamente molto disuniformi. Ciò comporta problemi di impatto ambientale, di costi economici e di effettiva realizzabilità dei progetti. Allo scopo di superare queste criticità si sono sviluppati sistemi isolanti che prevedono l'utilizzo di gas diversi dall'aria che, dovendo essere contenuti in opportuni involucri, possono lavorare a pressione più elevata di quella atmosferica, migliorando le capacità dielettriche: fra questi, il più utilizzato è l'esafluoruro di zolfo.

La molecola dell'SF₆ è fortemente elettronegativa, ovvero ha una forte attitudine a catturare gli elettroni liberi, rallentando la formazione delle valanghe elettroniche che costituiscono il primo stadio del processo di scarica.

L'esafluoruro di zolfo a pressione atmosferica, in situazione di campo elettrico uniforme, ha una rigidità dielettrica di 89kV/cm, ovvero il triplo rispetto al valore dell'aria a parità di condizioni d'impiego. L'SF₆ è inerte e trasparente; non è tossico e non è infiammabile; ha densità circa 5 volte superiore a quella dell'aria, per cui se viene inalato ha effetto soffocante. Esso offre ottime caratteristiche per lo spegnimento dell'arco elettrico il quale, tuttavia, innesca processi di decomposizione che producono sostanze tossiche e aggressive, le quali tuttavia non intaccano le proprietà isolanti.

I valori di pressione di esercizio non superano i 500÷600kPa, a cui corrisponde una temperatura di liquefazione di -30°C.

Nelle realizzazioni pratiche la capacità di tenuta cresce meno che linearmente con l'aumentare della pressione e viene apprezzabilmente ridotta per effetto della rugosità della superficie degli elettrodi e della presenza di particelle estranee. L'influenza della rugosità dei

conduttori sulla tensione di scarica si fa sentire maggiormente quando le pressioni in gioco sono elevate; mentre per ridurre le problematiche legate alla presenza di impurità si può ricorrere all'estrazione mediante pompa a vuoto oppure all'eliminazione attraverso una serie di scariche volontarie.

Per quanto riguarda le applicazioni nelle apparecchiature elettriche, l'esafluoruro di zolfo ha l'inconveniente di essere costoso e di contribuire all'aumento dell'effetto serra molto più della CO_2 . Tale aspetto ecologico diventerà sempre più importante nel futuro dato che la quantità prodotta annualmente a livello mondiale sta crescendo più che linearmente.

Per questi motivi, negli ultimi decenni, la ricerca si è orientata sull'impiego dell' SF_6 in miscela con altri gas, in particolare con l'azoto che, essendo il principale componente dell'atmosfera terrestre, non presenta problemi di inquinamento. Confrontando il rapporto tra il campo critico in miscele di N_2/SF_6 ed SF_6 puro si vede che con solo il 20% di esafluoruro di zolfo si ottiene una capacità di tenuta della miscela, in campo quasi uniforme, che è il 75% rispetto a quella dell'elemento puro.

Va infine osservato che la tensione di scarica di miscele N_2/SF_6 è meno sensibile alla presenza di particelle e alla rugosità della superficie rispetto al comportamento dell' SF_6 puro.

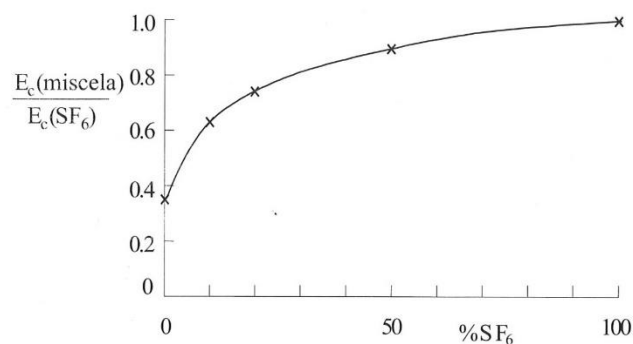


Fig. 2.9 rapporto tra il campo critico in miscele di N_2/SF_6 ed SF_6 puro al variare della sua percentuale

2.4.2. Dielettrici allo stato liquido

I dielettrici liquidi sono largamente utilizzati e apparentemente hanno enormi vantaggi: hanno valori di densità più elevati rispetto ai gas, presentano un comportamento autoripristinante, non avendo forma propria garantiscono un riempimento ottimale dello spazio interelettrodico e possono essere sottoposti a processi di purificazione che ne ripristinano le qualità isolanti dopo un certo periodo di utilizzo. Inoltre in molte situazioni vengono sfruttati anche come fluido refrigerante per asportare il calore prodotto dalla circolazione di corrente nelle parti conduttive.

Malgrado queste caratteristiche positive, nella quasi totalità delle applicazioni pratiche gli isolanti allo stato liquido vengono utilizzati in combinazione con i dielettrici solidi. Questa limitazione è dovuta al fatto che le caratteristiche dielettriche di un liquido sono fortemente condizionate dal suo grado di purezza, ma nelle condizioni reali è di fatto impossibile evitare la presenza di particelle estranee, inclusioni di gas e di altri liquidi, tanto più probabile quanto elevato è il volume considerato.

Gli isolanti liquidi più diffusi sono gli oli minerali e gli oli sintetici.

Per ragioni di sicurezza la normativa impone dei limiti all'infiammabilità di tali oli, diversi a seconda del tipo e dell'ambiente di utilizzo. Un parametro di riferimento è la *temperatura di*

infiammabilità alla quale i vapori che l'olio libera quando viene riscaldato si accendono se posti in contatto con la fiamma. La *temperatura di autoaccensione*, invece, è superiore alla precedente e rappresenta la soglia a cui i vapori sono in grado di innescare spontaneamente la fiamma.

Proprietà	Olio Minerale	Olio Sintetico
Rigidità dielettrica (kV/cm)	250	100
Resistività (Ωm)	10^{12}	10^{13}
Costante dielettrica relativa	2.2	2.8
Fattore di dissipazione	0.001	0.0002
Densità (kg/m^3)	890	970
Conducibilità termica (W/K m)	0.14	0.16
Calore specifico (J/kg K)	1800	2000
Temper. infiammabilità ($^{\circ}\text{C}$)	>130	>300

Tab. 2.1 principali proprietà degli oli isolanti più diffusi

Una delle cause principali di deterioramento dell'olio è il processo di ossidazione che si presenta in seguito al contatto con l'aria e che viene facilitato da eventuali sovratemperature. I prodotti di ossidazione determinano una diminuzione della resistività e della rigidità dielettrica, un aumento delle perdite e la possibilità di un attacco corrosivo della sostanza con cui l'olio viene in contatto; per evitarne la formazione si utilizzano contenitori a tenuta.

Un'altra importante valutazione da fare è quella sulla tossicità del dielettrico liquido utilizzato, non solo in forma pura ma anche sui prodotti della decomposizione in seguito ad incendio o scarica.

2.4.3. Dielettrici allo stato solido

Gli isolanti solidi costituiscono in genere una parte determinante nell'isolamento delle apparecchiature elettriche. A differenza di gas e liquidi, essi possiedono forma propria e svolgono anche funzioni meccaniche e di sostegno delle parti conduttrici.

I dielettrici solidi disponibili sono molto numerosi e di conseguenza le loro caratteristiche sono abbastanza varie: in generale hanno una buona tenuta dielettrica, non disciolgono impurità o gas a contatto con l'atmosfera e non consentono la migrazione di particelle conduttrici sotto l'azione del campo elettrico. Per contro, possono comportare maggiori complicazioni costruttive a causa della possibilità che si formino interstizi gassosi a minore rigidità dielettrica fra il conduttore in tensione e il sistema d'isolamento. Inoltre non sono autoripristinanti, raramente sono omogenei e spesso sono igroscopici. Quando sono in esercizio, possono essere soggetti a pressioni elevate là dove il campo elettrico è particolarmente intenso e sperimentare aumenti di temperatura che possono nuocere alle loro proprietà.

Uno degli aspetti fondamentali che condiziona la capacità di tenuta di molti dielettrici solidi è la durata d'applicazione della sollecitazione: esistono infatti dei meccanismi che possono portare alla scarica e che richiedono tempi tanto più ridotti quanto più la sollecitazione è elevata (Fig.2.10). Per questo la rigidità dielettrica a lungo termine è funzione della "storia" delle sollecitazioni elettriche, termiche e meccaniche, specialmente se la matrice dell'isolante è di tipo organico.

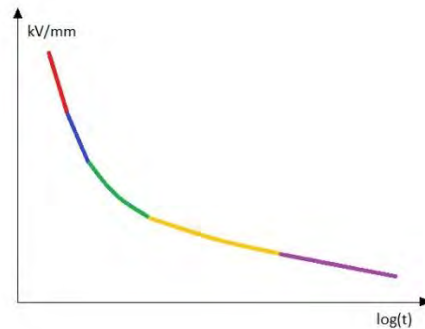


Fig. 2.10 riduzione della rigidità dielettrica rispetto al tempo di applicazione della sollecitazione

- **ZONA ROSSA – rigidità intrinseca:** per tempi di applicazione della sollecitazione molto brevi si ottengono valori di tenuta estremamente alti a cui ci si riferisce come *rigidità intrinseca*. Questo valore si identifica in pratica con il più elevato campo applicabile ad un materiale puro, in assenza del minimo difetto di struttura e di possibili fenomeni di conduzione, di degrado e di instabilità. La rigidità intrinseca ha un interesse prevalentemente teorico in quanto nella pratica ingegneristica non è mai possibile utilizzare un materiale a sollecitazioni prossime ad essa.
- **ZONA BLU – Collasso elettromeccanico:** questa modalità di cedimento di un isolante si verifica quando la forza di compressione elettrostatica supera il limite di rottura a compressione e non viene più bilanciata dalla reazione elastica.
- **ZONA VERDE – Streamer:** nelle realizzazioni pratiche non può essere esclusa la presenza di parti appuntite sulla superficie dell'elettrodo, le quali possono portare a zone di campo talmente elevato da permettere lo sviluppo di una scarica per il passaggio di numerosi elettroni in banda di conduzione in uno spazio estremamente localizzato. Questo comporta la formazione di una carica spaziale concentrata, una notevole intensificazione di campo e la formazione di un breve tratto di canale di scarica. Questo canale si allunga non necessariamente seguendo le linee di campo e determina il cedimento del dielettrico quando riesce ad attraversare tutto il gap cortocircuitando gli elettrodi.
Un fenomeno di questo tipo si può originare anche quando siamo in presenza di zone di distacco fra il dielettrico e l'elettrodo riempite di materiali a rigidità dielettrica ridotta.
- **ZONA GIALLA – Collasso termico:** ogni materiale isolante sottoposto a un campo elettrico è sede di dissipazione di energia a causa delle perdite che ne aumentano la temperatura. Qualora l'energia dissipata nel materiale superi quella trasmessa all'esterno si può arrivare al cedimento del materiale.
- **ZONA VIOLA – Degrado e tracciamento:** quando si ha a che fare con gli isolanti solidi di tipo organico si deve tenere presente che i legami chimici costituenti hanno delle energie molto basse per cui un modesto aumento di temperatura è sufficiente ad innescare delle reazioni chimiche che peggiorano la tenuta dielettrica.
Con il termine *tracciamento* si intende la formazione di percorsi conduttivi permanenti lungo la superficie di un isolante. Tale fenomeno è causato dal passaggio di una corrente di fuga dovuta ad una riduzione della resistenza superficiale ed è legato alle condizioni di temperatura, pressione e umidità.

- **Materiali polimerici**

I materiali polimerici sono realizzati con prodotti organici di sintesi e vengono indicati anche con il nome di materie plastiche o di resine sintetiche. Essi sono costituiti da *macromolecole*, ovvero da insiemi comprendenti qualche decina di migliaia di *monomeri* di base, legate l'una all'altra in modo da formare lunghissime catene interconnesse tra loro mediante legami più

deboli. Il processo di formazione di tali catene si indica con il termine *polimerizzazione*, mentre il prodotto delle reazioni prende il nome di *omopolimero* se è ottenuto con un solo tipo di monomero, oppure di *copolimero* se invece comprende più tipi di monomeri.

I diversi monomeri possono legarsi fra loro in maniera differente, originando polimeri con struttura lineare, ramificata o reticolata, le cui proprietà dipendono dal grado di polimerizzazione raggiunto. [4]

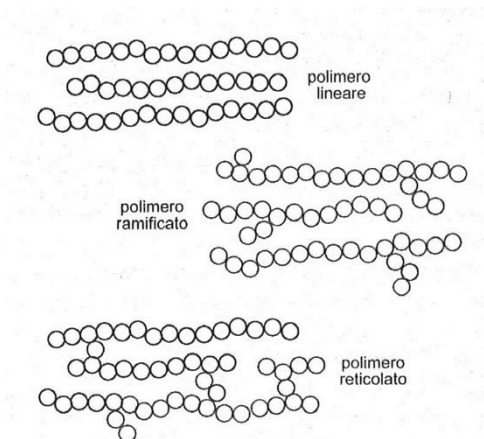


Fig. 2.11 configurazione di base dei polimeri a) lineare b) ramificata c) reticolata

I polimeri vengono ampiamente utilizzati nelle applicazioni elettriche non solo per le loro spiccate proprietà isolanti, ma anche per le doti di leggerezza, la facilità di lavorazione, il costo in genere contenuto e per la possibilità di realizzare forme anche molto complesse mediante stampaggio.

Le proprietà meccaniche possono variare entro un ampio spettro, ma in genere sono piuttosto modeste rispetto a quelle della maggioranza dei materiali metallici o ceramici. In particolare, rispetto ai metalli, i polimeri sono caratterizzati da bassi valori di densità, resistenza, rigidità, conducibilità termica, da una buona resistenza all'attacco chimico e da un elevato coefficiente di dilatazione termica.

Le proprietà dei polimeri possono essere migliorate con l'aggiunta di varie classi di *additivi* con funzioni molto diversificate: si utilizzano dei *riempitivi* per abbassare il peso o il costo del materiale oppure per migliorare notevolmente le caratteristiche meccaniche; si ricorre ai *plastificanti* per rendere meno rigido il materiale oppure agli *indurenti* per ottenere l'effetto opposto; ci si serve invece degli *stabilizzanti* per evitare o ritardare l'invecchiamento del polimero conseguente all'azione della luce, del calore, dell'umidità e dell'ossidazione.

Come caratteristiche negative dei polimeri dobbiamo ricordare la scarsa resistenza al fuoco, la tossicità dei prodotti di combustione e spesso la ridotta resistenza ai solventi organici.

I polimeri si classificano in tre gruppi in base alla loro struttura molecolare:

1. I polimeri *termoplastici* sono quelli che variano in modo reversibile il loro stato di aggregazione per effetto del calore, diventando praticamente deformabili all'aumentare della temperatura e ritornando rigidi quando vengono raffreddati.
2. I polimeri *termoindurenti* sono caratterizzati dal fatto che il calore o un processo di catalisi⁴ li fanno passare in maniera irreversibile da uno stato nel quale sono fusibili e solubili ad un altro nel quale non sono né fusibili né solubili.

⁴ La *catalisi* è un fenomeno chimico per cui la velocità di una reazione chimica subisce delle variazioni per l'intervento di una sostanza, detta catalizzatore, che non viene consumata al procedere della reazione stessa.

3. Gli *elastomeri* sono quei polimeri che a temperatura ambiente possono subire allungamenti fino al doppio della dimensione iniziale, ritornando alla misura originaria quando la sollecitazione viene annullata.

materiale	rigidità (kV/cm)	ϵ_r	resistività (Ωm)	$\tan\delta$
Polietilene - LDPE	200÷250	2.3	10^{16}	0.0005
Polietilene - HDPE	200	2.3	10^{16}	0.0007
Polietilene - XLPE	200÷250	2.4	10^{16}	0.0003
Polietilene - PET - Mylar™	2800÷3000	3.2	10^{16}	0.005
PVC – rigido	200÷500	3÷4	10^{14}	0.007÷0.02
PVC – flessibile	100	5.5	$10^{13}\div 10^{14}$	0.08÷0.15
PVC – film	720	4÷8	10^{14}	0.07÷0.16
Policarbonato	150÷200	3÷3.2	$2\cdot 10^{14}$	0.0015
Polipropilene	200÷350	2.2÷2.6	$>10^{14}$	0.0003
Polistirene	200	2.5÷2.7	$10^{15}\div 10^{16}$	0.0002
Resina epossidica	150÷200	3.5÷5	$10^{10}\div 10^{15}$	0.002÷0.02
Resina siliconica	220	2.7÷3	10^{13}	0.007÷0.01
Resina poliestere	100÷200	3÷4.5	$10^{10}\div 10^{12}$	0.006÷0.04
Gomma siliconica	200	3÷3.6	10^{13}	0.01
EPDM	200÷300	2.5÷3.5	10^{14}	0.007

Tab. 2.2 principali proprietà dei materiali polimerici

Termoplastici	Termodurenti	Elastomeri
---------------	--------------	------------

Il *polietilene* si presta alla realizzazione di guaine termorestringenti per le giunzioni dei cavi; nella versione *XLPE* è diffusamente impiegato per l'isolamento dei cavi coassiali per alte frequenze e per cavi di potenza fino ai 550kV.

Il *polietilene tereftalato*, noto con il nome commerciale Mylar™, viene prodotto in nastri di varia forma destinati ad essere utilizzati nell'isolamento in cava dei conduttori dei motori, come elemento di separazione e isolamento nei trasformatori, nonché come dielettrico nei condensatori.

Il *PVC* trova applicazione in forma flessibile per l'isolamento dei conduttori di bassa tensione e dei cavi di energia fino a 10kV, mentre con la forma rigida si realizzano i tubi da incasso per cavi elettrici, spine, cassette di derivazione e simili.

Le *resine epossidiche* si utilizzano per realizzare l'isolamento degli avvolgimenti dei trasformatori in aria e dei trasformatori di misura, isolatori sia di sostegno che passanti, alcuni particolari dei sezionatori, parti meccaniche con funzioni di supporto.

Fra gli elastomeri, l'*EPR* e l'*EPDM* trova impiego per la produzione di elementi ed accessori per alte tensioni realizzati tramite iniezione. Le gomme siliconiche vengono utilizzate per le loro proprietà idrorepellenti nelle guarnizioni e negli elementi di tenuta dei connettori di media e alta tensione; sono sfruttate anche per realizzare le alette di isolatori con corpo in resina epossidica nelle applicazioni per cui è richiesto il mantenimento delle proprietà isolanti anche in atmosfera contaminata.

In questa sede è opportuno considerare anche le *vernici isolanti*: esse sono ottenute in forma liquida miscelando le resine con opportuni solventi di varia natura. Alla formazione dello strato solido può contribuire la sola evaporazione del solvente o anche un insieme di processi

di ossidazione e polimerizzazione che conferiscono al film migliori caratteristiche di durezza e compattezza. Nelle applicazioni pratiche trovano impiego non solo per la loro funzione isolante ma anche come protezione dagli agenti esterni.

2.4.4. Interfaccia tra dielettrici di tipo diverso

Quando il campo elettrico interessa le superfici di separazione fra dielettrici con costanti dielettriche relative diverse fra loro si manifesta il fenomeno della rifrazione elettrostatica, illustrato in Fig.2.12 e regolato dall'equazione seguente:

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} \quad (2.25)$$

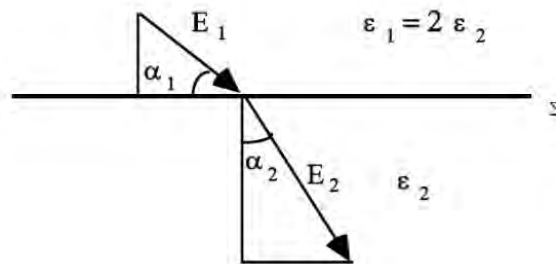


Fig. 2.12 rifrazione elettrostatica

Passando ad un mezzo 1 (es. resina epossidica) ad un mezzo 2 (es. gomma siliconica o aria libera) a permittività minore, aumenta la componente normale del campo elettrico e quindi la sua intensità, rimanendo inalterata la componente tangenziale. Il mezzo 2 risulta quindi essere più sollecitato e possono verificarsi condizioni più prossime a quelle critiche.

Per contenere il più possibile l'intensificazione del campo elettrico nel mezzo a costante dielettrica relativa minore si possono adottare diversi approcci.

- **Scelta del profilo del dielettrico solido**

Spesso un dielettrico solido viene interposto con funzioni meccaniche, tendenti cioè a sostenere e tenere separati elettrodi a diverso potenziale. Se è nota la mappa del campo elettrico (superfici equiflusso ed equipotenziali), gli isolatori potranno essere sagomati in modo che:

- le superfici di separazione non intersechino superfici di flusso
- le superfici di separazione non intersechino superfici equipotenziali

Nel primo caso il campo elettrico risulta imperturbato dalla presenza dell'isolatore, cioè la sua distribuzione è esattamente identica al caso di presenza di dielettrico gassoso. Nel secondo caso le superfici dielettriche ortogonali alle linee del campo non possono in genere determinare rifrazione, ma solo intensificazione del campo elettrico nell'aria rispetto al caso di assenza di disomogeneità. Tale intensificazione può essere ridotta riducendo al minimo (compatibilmente con i requisiti meccanici) il volume dell'isolatore. L'impiego di elettrodi ausiliari, a potenziale vincolato o flottante, consente di attenuare ulteriormente l'intensificazione del campo dovuta a configurazioni a punta o alla inevitabile presenza di spigoli.

- **Metallizzazione delle superfici**

Con la formazione di sottili strati metallici, in genere di alluminio, mediante verniciatura, spruzzatura o deposizione, si può portare una superficie del dielettrico solido interposto tra

armature metalliche ad avere lo stesso potenziale dell'elettrodo adiacente. Negli inevitabili interstizi d'aria o altri gas tra elettrodi e dielettrico non possono quindi più formarsi scariche parziali. In tal modo si può allungare notevolmente la vita del dielettrico. È tuttavia da segnalare che la metallizzazione richiede accuratezza notevole, sia in ordine a problema di compatibilità e stabilità chimica, sia in relazione a problemi di adesione a breve e lungo termine (lo strato metallico deve aderire al dielettrico in ogni condizione di sollecitazione termica e meccanica). Il dielettrico non deve inoltre essere poroso o permeabile alla vernice o ai vapori, in quanto si verrebbero a creare filamenti metallici con notevole intensificazione del campo locale.

Anche le vernici o smalti semiconduttori possono essere utilizzati quali rivestimenti superficiali laddove si prevede una consistente disuniformità del campo.

3. RESINA EPOSSIDICA

3.1. CHIMICA E PROCESSO DI POLIMERIZZAZIONE

Le resine epossidiche sono una classe di prepolimeri reattivi contenenti gruppi epossidici⁵ a carattere termoindurente.

Le resine termoindurenti sono materiali molto rigidi, nei quali il moto delle catene polimeriche è fortemente vincolato all'elevato numero di reticolazioni esistenti, determinate dai legami covalenti trasversali formati tra i prepolimeri di partenza durante il processo di polimerizzazione. La densità delle interconnessioni e la loro natura dipendono moltissimo dalle condizioni di polimerizzazione e dalla natura dei precursori: generalmente essi sono sistemi liquidi, o facilmente liquefacibili, costituiti da composti organici a basso peso molecolare, derivati in prevalenza dalla raffinazione del petrolio.

I campi di utilizzo delle resine epossidiche sono molto vari: vengono impiegate come adesivi strutturali, per la fabbricazione di strumenti da lavoro, nel campo delle vernici e delle pavimentazioni, nell'elettronica e nei circuiti stampati. Uno dei settori principali è anche quello degli isolatori per media e alta tensione.

Per le applicazioni isolanti di media tensione sono disponibili le resine al bisfenolo A e al bisfenolo F, la cui struttura chimica è riportata in Fig.3.1. Nella pratica si utilizzano soprattutto le resine al bisfenolo A in quanto quelle al bisfenolo F comportano delle notevoli criticità meccaniche sui prodotti finali.

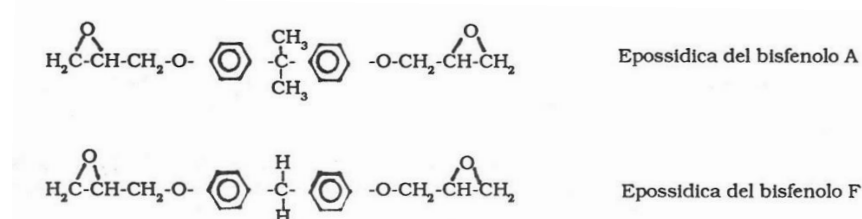


Fig. 3.1 struttura chimica delle resine epossidiche del bisfenolo A e del bisfenolo F

La maggior parte delle formulazioni di resina epossidica ha bisogno di un *indurente* per polimerizzarsi; ovvero di un agente di reticolazione che reagendo con i gruppi epossidici trasforma la resina di base in un sistema reticolato tridimensionale.

Gli indurenti possono appartenere a due categorie: gli *amminici* e gli *anidridici*.

Gli indurenti amminici vengono utilizzati solamente per le mescole che polimerizzano a freddo. Si distinguono in ammine alifatiche, cicloalifatiche e aromatiche, con reattività chimica crescente in quest'ordine. Gli indurenti amminici variano sia le proprietà del materiale durante il processo, alterando i valori di viscosità e di reattività, sia le proprietà del pezzo finito, come le qualità meccaniche, elettriche e chimiche.

Gli indurenti anidridici vengono utilizzati quando nel sistema epossidico è presente della carica minerale (come nel caso della produzione di isolatori per media tensione), per la loro bassa viscosità e per l'elevato grado di latenza. Infatti, dal punto di vista del processo industriale, è conveniente lavorare con indurenti latenti, ovvero con sostanze che reagiscono con la resina di base solo a temperature elevate, in modo tale da poterli mixare e stoccare

⁵ Un *gruppo epossidico* è costituito da un atomo di ossigeno e due di carbonio

indipendentemente dalle tempistiche di realizzazione dei prodotti finali. Inoltre gli indurenti anidridici garantiscono un miglior comportamento in relazione all'invecchiamento termico, alla possibilità di caricare il sistema epossidico in percentuale maggiore, al raggiungimento di valori più elevati della temperatura di transizione vetrosa.

La reazione di reticolazione o *curing* inizia con la formazione e la crescita lineare delle catene polimeriche costituite da legami covalenti. Man mano che il processo avanza, il peso molecolare del materiale cresce rapidamente.



Fig. 3.2 reazione di reticolazione

Il primo step del processo di polimerizzazione è la *gelificazione*: essa rappresenta il passaggio del materiale dalla forma liquido-viscosa alla forma gel-elastica e comporta la formazione della struttura tridimensionale di base. Prima della gelificazione, in assenza di agente reticolante, le particelle di resina sono separate tra di loro o interagiscono solo in virtù di deboli forze intermolecolari. Al progredire della reazione di curing si formano i legami covalenti che, coesistendo con le primigenie interazioni deboli, determinano la creazione di un gel covalente caratterizzato da legami più resistenti, a cui ci si riferisce generalmente con il termine di *sistema bifasico sol-gel*.

Procedendo nella reazione di polimerizzazione si incontra la fase di *vetrificazione*, ovvero la trasformazione del gel elastico in solido vetroso: questo momento segna anche la variazione nel controllo cinetico del meccanismo di reazione che da uno di tipo chimico passa ad uno di tipo diffusivo, facendo decadere rapidamente la velocità della reazione stessa.



La Fig.3.3 mostra un diagramma generalizzato delle trasformazioni isoterme tempo-temperatura, diagramma TTT (Temperatura-Tempo-Trasformazione), dove si riporta il tempo sperimentale per raggiungere i diversi step della polimerizzazione, in funzione della temperatura di curing. [5]

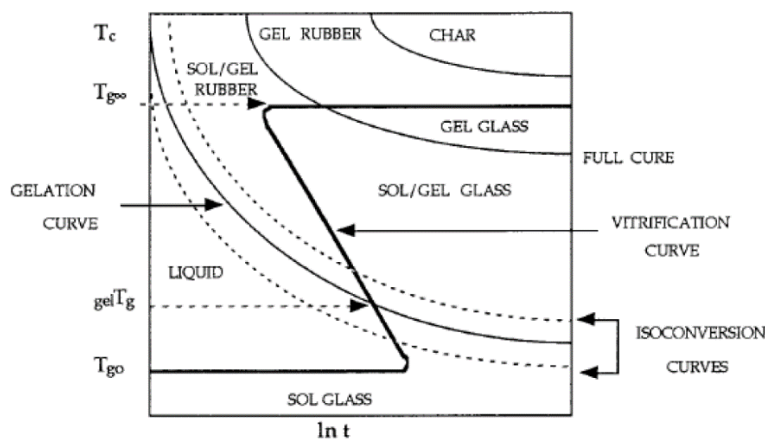


Fig. 3.3 diagramma isoterma generalizzato TTT a differenti temperature di curing

Sul diagramma si leggono tre temperature importanti per l'avanzamento della reazione di reticolazione:

- T_{g0} è la temperatura al di sotto della quale non avviene reazione fra resina e indurente e può essere un riferimento per la conservazione del materiale che non si desidera reticolare.
- ${}_{gel}T_g$ indica la temperatura a cui, in un sistema ideale, gelificazione e vetrificazione avvengono contemporaneamente. Tra T_{g0} e ${}_{gel}T_g$ la resina liquida reagisce finché la sua temperatura di transizione vetrosa coincide con la temperatura di polimerizzazione che rappresenta il punto d'inizio della vetrificazione.
- $T_{g\infty}$ è la temperatura di reticolazione a cui il grado di reazione raggiunge il valore massimo, teoricamente uguale a uno, che però è impossibile raggiungere a livello sperimentale. Per temperature comprese fra ${}_{gel}T_g$ e $T_{g\infty}$ la gelificazione precede la vetrificazione.

Se la temperatura del processo di polimerizzazione supera $T_{g\infty}$, ovvero la temperatura di transizione vetrosa del materiale completamente reticolato, il materiale resterà allo stato di gel fino a carbonizzarsi.

Sebbene alcune combinazioni di resina e indurente possano polimerizzarsi a temperatura ambiente, la maggior parte delle mescole richiede temperature superiori ai 150°C e in casi particolari anche oltre i 200°C. Qualora l'energia termica fornita al processo di polimerizzazione non fosse sufficiente, la reticolazione non si completerebbe, determinando una riduzione delle proprietà meccaniche, termiche e chimiche nel prodotto finale.

3.1.1. Caratterizzazione e importanza della T_g

La *temperatura di transizione vetrosa* T_g rappresenta un parametro fondamentale del sistema epossidico, a cui si fa riferimento per valutarne le caratteristiche meccaniche, fisiche e di lavorazione. Come è stato già detto, essa rappresenta la temperatura critica che separa il comportamento vetroso dal comportamento gommoso: infatti al di sotto della T_g sono congelati tutti i movimenti di contorsione, rotazione e traslazione della molecola, rimane solamente l'energia sufficiente per la vibrazione degli atomi intorno alla posizione di equilibrio.

La T_g ha influsso sul comportamento termodinamico e sullo stato delle tensioni meccaniche interne, sulla resistenza agli agenti chimici, sulla diffusione dei gas, sulla resistività elettrica nonché sulle perdite e sulla costante dielettrica. [6] Inoltre la temperatura di transizione vetrosa è importante perché è una caratteristica del sistema epossidico impiegato: ogni mescola ha una sua T_g massima che può essere raggiunta solo se la temperatura di curing non scende al di sotto di determinati valori (solitamente +20°C sulla T_g massima), quindi è possibile individuare eventuali errori di miscelazione o di polimerizzazione mediante la misura della T_g .

La Tab.3.1 contiene gli intervalli T_g dei più comuni sistemi epossidici utilizzati.

Sistema epossidico	T_g (°C)
Araldite XB 5992	105-115
Araldite CY 5622	100-115
Isepox 270	110-120
Isepox 280	110-125
Araldite CY 5995	130-150
Araldite 5997	100-110

Tab. 3.1 temperatura di transizione vetrosa

Si devono indicare degli intervalli e non dei valori specifici in quanto il valore della T_G dipende dal tempo e dalla temperatura con cui si fa sviluppare la polimerizzazione (Fig.3.4), oltre che dal gradiente di temperatura di raffreddamento e dalla presenza di additivi.

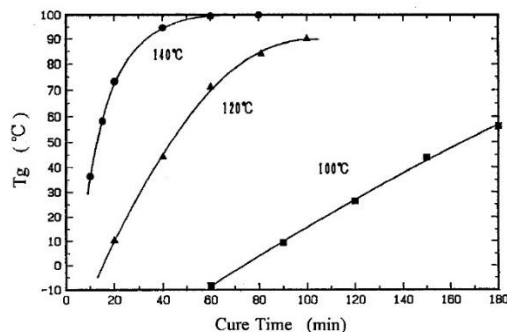


Fig. 3.4 relazione fra T_G e tempo di polimerizzazione, al variare della temperatura di curing

La temperatura di transizione vetrosa può subire delle piccole alterazioni rispetto al valore nominale a seconda della velocità di raffreddamento del pezzo finito che ne regola il grado di cristallinità. Si deve infatti tenere presente che all'aumentare del grado di cristallinità il polimero diventa più rigido e denso ed aumenta la resistenza al calore e ai solventi, a prezzo però di una diminuzione di elasticità e di duttilità. Un polimero parzialmente cristallino può essere considerato un materiale a due fasi ed è tanto più visivamente opaco quanto più c'è differenza di densità fra la fase amorfa e quella cristallina.

Dal punto di vista delle proprietà fisiche del sistema epossidico, la temperatura di transizione vetrosa segna il passaggio tra diversi comportamenti del materiale sia in merito al modulo elastico che al volume specifico.

Il rapporto tra i valori del modulo di elasticità prima e dopo la T_G è di circa 100.

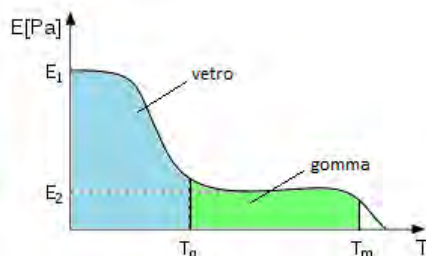


Fig. 3.5 variazione del modulo elastico con la temperatura

È importante sottolineare che, nonostante le resine epossidiche siano dei polimeri termoindurenti, nell'intervallo di temperatura fra il valore della T_G e $60\div 80^\circ\text{C}$ al di sotto di essa si evidenzia un comportamento plasto-elastico più o meno spiccato. Infatti è stato provato sperimentalmente che quando uno stress meccanico viene applicato ad un provino che si trova ad una temperatura poco al di sotto della T_G , le forze che legano le catene polimeriche sono ancora troppo deboli e non sono in grado di impedire uno scorrimento irreversibile. Da ciò si può dedurre che la deformazione conseguente all'applicazione di uno stress meccanico sia tanto più marcata e veloce quanto più la temperatura di prova (o di servizio) si avvicina al valore T_G .

Se consideriamo la dipendenza del volume specifico dalla temperatura (Fig.3.6) si osserva una diminuzione lineare a tratti del volume specifico man mano che la temperatura si

abbassa. Questo comportamento è attribuibile a due fenomeni che avvengono contemporaneamente nel fuso:

- Una *contrazione di configurazione*, dovuta al fatto che le macromolecole tendono ad assumere delle configurazioni cristalline, impacchettandosi più strettamente fra loro e con ciò riducendo gli spazi intermolecolari presenti.
- Una *contrazione di legame*, cioè una progressiva riduzione dell'ampiezza di vibrazione degli atomi al raffreddamento.

Tutti i materiali tendono a cristallizzare se vengono raffreddati al di sotto della temperatura di fusione T_M , in quanto l'energia di un insieme di atomi impaccati è minore di quella di qualsiasi altra disposizione, perciò essa rappresenta la configurazione termodinamicamente più stabile.

Tra la temperatura di fusione e la temperatura di transizione vetrosa la pendenza della curva è meno marcata: questo è determinato dal fatto che in questa situazione nel materiale coesistono delle zone cristallizzate e delle zone amorfe, le quali però hanno ancora la possibilità di riorganizzare le catene polimeriche per giungere a configurazioni più ordinate.

Al raggiungimento della T_G la pendenza della curva diminuisce ulteriormente perché la configurazione strutturale si blocca e cessa la possibilità di movimenti di traslazione o rotazione dei segmenti delle catene polimeriche. A questo punto infatti, le macromolecole non possono più mutare la loro configurazione per giungere ad una sistemazione più compatta, perciò l'ulteriore variazione di volume specifico con la temperatura è dovuta solo alla riduzione dell'ampiezza di vibrazione degli atomi.

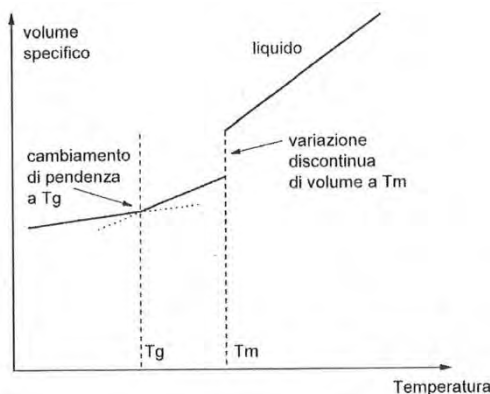


Fig. 3.6 relazione tra il volume specifico e la temperatura

• Tecniche di misurazione

Oltre che con la variazione di volume, il cambiamento di stato corrispondente alla temperatura di transizione vetrosa può essere valutato dalla misura del calore specifico a pressione costante del materiale in esame. L'entalpia H , il calore specifico a pressione costante C_p e l'entropia S , che ricordiamo essere l'espressione diretta dell'ordinamento strutturale di un materiale, sono grandezze interdipendenti in quanto valgono le relazioni:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p + \text{cost.} \quad (3.1)$$

$$S = \int \frac{C_p}{T} dT + \text{cost.} \quad (3.2)$$

Con la *calorimetria differenziale* (DSC) è possibile misurare il C_p e quindi la T_G su pochi mg di sostanza: essa si basa sulla misura mediante termocoppie del flusso termico fra il campione

in esame e quello di riferimento, mentre i due sono vincolati a una temperatura variabile definita da un programma prestabilito. In Fig.3.7 è riportato un esempio dei risultati della DSC sulla misura della T_G .

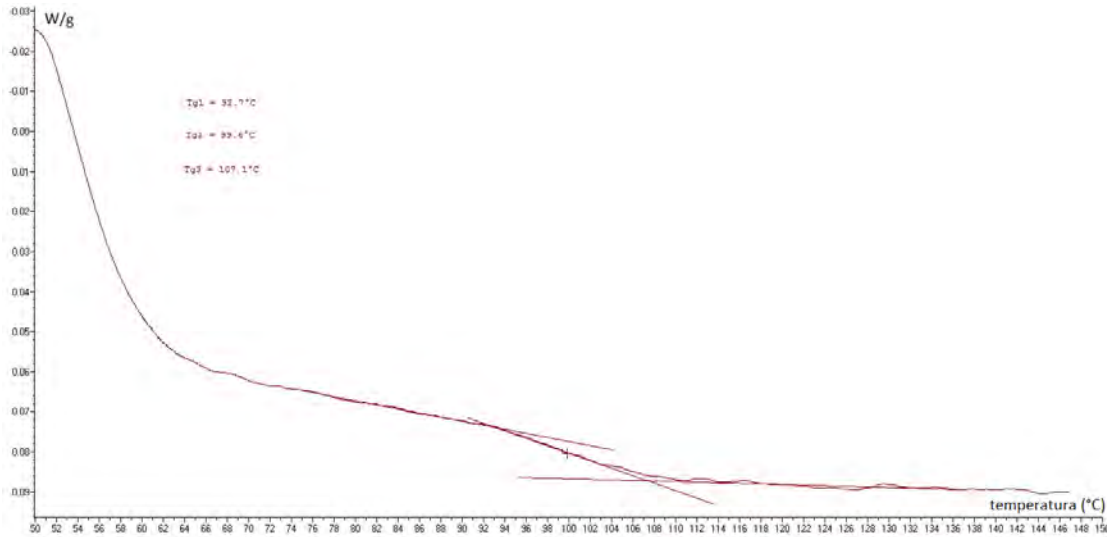


Fig. 3.7 misura della T_g tramite DSC

È possibile misurare la T_G anche utilizzando l'*analisi dinamico-meccanica* (DMA): essa si basa sul fatto che i polimeri sono materiali a carattere visco-elastico, ovvero combinano le caratteristiche dei solidi elastici e a quelle dei fluidi newtoniani⁶. La legge di Hooke che regola il comportamento elastico dei materiali postula la proporzionalità fra stress applicato e deformazione subita, indipendentemente dall'intensità della forza. La teoria dell'idrodinamica prevede invece che l'entità della risposta alla sollecitazione meccanica dipenda dal valore della stessa. La DMA sfrutta il modello di Maxwell per descrivere il comportamento viscoelastico del sistema epossidico, il quale si comporta in modo elastico su intervalli di tempo brevi e in modo viscoso su intervalli di tempo lunghi, quindi può essere efficacemente rappresentato da un dissipatore viscoso in serie ad una molla elastica.

Nell'analisi dinamico-meccanica il provino viene sottoposto ad uno stress sinusoidale σ e viene misurata la sua deformazione γ :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(t\omega + \theta) \quad (3.3)$$

$$\gamma = \gamma_0 \sin(t\omega) \quad (3.4)$$

dove ω è la pulsazione dello stress, t è il tempo, θ è la differenza di fase fra sforzo e deformazione. Per un solido elastico θ è nulla, per un fluido viscoso $\theta=90^\circ$, mentre per un polimero viscoelastico è compresa fra questi due valori.

Partendo da queste due misurazioni si calcola:

→ Lo *storage modulus* che rappresenta la quota parte elastica

$$W' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \theta \quad (3.5)$$

→ Il *loss modulus* che rappresenta la quota parte viscosa

⁶ Un fluido newtoniano è un fluido la cui viscosità non varia con la velocità a cui viene misurata

$$W'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \theta \quad (3.6)$$

Ovviamente la differenza di fase risulterà essere:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{W''}{W'} \quad (3.7)$$

Alla temperatura di transizione vetrosa lo storage modulus decresce fortemente e il loss modulus invece sperimenta un massimo: monitorandoli entrambi si riesce a determinare efficacemente l'intervallo di valori della T_G (Fig.3.8).

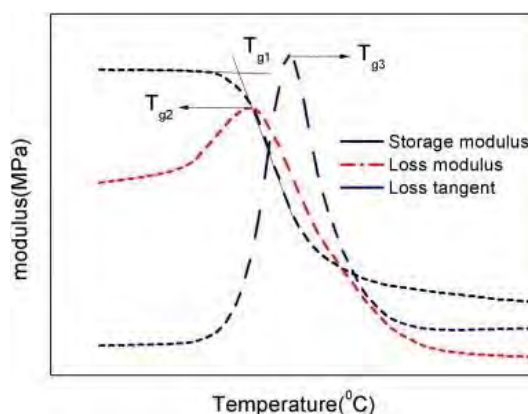


Fig. 3.8 misura della T_g tramite DMA

Monitorando il processo di polimerizzazione attraverso un'analisi dielettrica (DEA) è possibile valutare come variano le caratteristiche dielettriche della resina epossidica durante la polimerizzazione e quindi determinarne il valore di T_G . [7] Il principio di funzionamento della DEA è simile a quello della DMA se si sostituisce lo stress meccanico con un campo elettrico oscillante. Il grande vantaggio di questa tecnica è che permette di effettuare le misurazioni non solo in laboratorio sui pezzi finiti, ma anche nello svolgersi del processo.

In un tipico test il campione è posto in contatto con i due elettrodi costituenti il sensore dielettrico mentre ad uno di essi viene applicata una tensione sinusoidale. All'altro elettrodo si misura la corrente, la quale risulta sfasata e attenuata in modulo in relazione alla mobilità degli ioni e all'allineamento dei dipoli: misurando le variazioni di modulo e fase è possibile ricavare i valori della parte reale e della parte immaginaria della permittività complessa.

Dalla Fig.3.9 si evince che il valore della permittività complessa e del fattore di perdita decrescono durante la reazione di polimerizzazione.

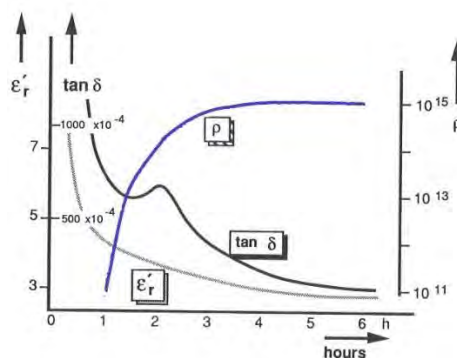


Fig. 3.9 variazione delle proprietà dielettriche durante la polimerizzazione

Il valore di resistività di volume ρ invece aumenta al progredire del processo di curing: infatti la resistività aumenta al crescere del valore di viscosità (Fig.3.10a), il quale a sua volta cresce all'avanzare della polimerizzazione. Dalla Fig.3.10b si vede che abbassando la temperatura di polimerizzazione il valore di resistività impiega più tempo per assestarsi al valore finale.

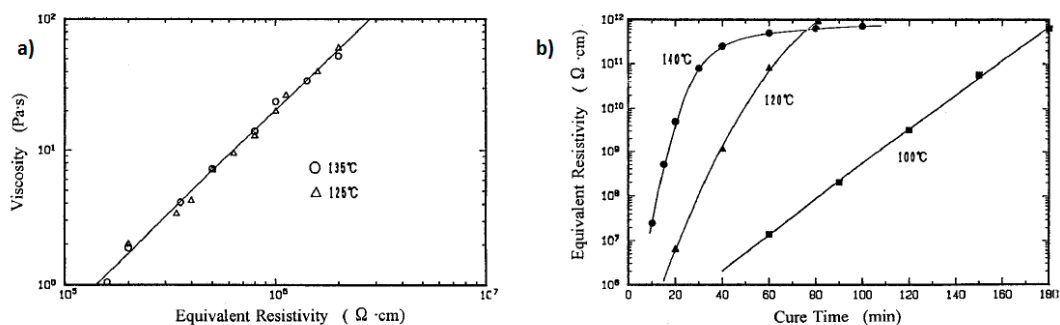


Fig. 3.10 dipendenza della resistività dalla viscosità e dal tempo di polimerizzazione

La Fig.3.11 mostra la relazione esistente fra il valore di resistività e la T_G : misurando il valore di resistività durante il processo produttivo si può monitorare istante per istante il valore della T_G e quindi tenere sotto controllo la qualità del processo produttivo senza peraltro danneggiare il pezzo.

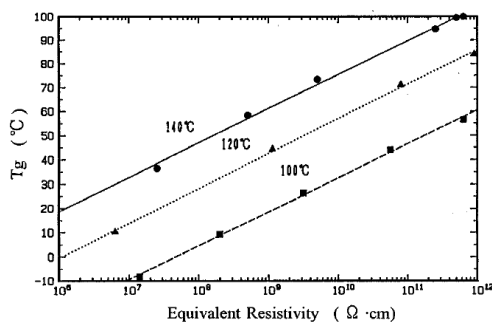


Fig. 3.11 relazione fra resistività e T_G a diverse temperature di curing

3.1.2. Carattere esotermico della polimerizzazione

È molto importante tenere presente che il processo di curing ha *carattere esotermico*: dalle misure calorimetriche si ricava che per ogni gruppo epossidico che polimerizza vengono liberati 26 kcal, ovvero 108 kJ. [8] Mediamente in ogni chilogrammo di resina ci sono 1.15 gruppi epossidici che polimerizzandosi forniscono $26 \cdot 1.15 \approx 30$ kcal/kg. Dato che il calore specifico dei comuni sistemi epossidici alla temperatura di curing è di circa $0.3 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$, si evince che la reazione di curing può determinare delle sovratemperature notevoli: in condizioni adiabatiche le temperature possono superare localmente anche di 100°C quelle di reticolazione. Valori così elevati possono comportare la distruzione termica del prodotto e/o la rottura meccanica innescata dalle forti differenze di temperatura; per evitare tali inconvenienti in alcuni casi si preferisce aumentare gradualmente la temperatura del processo, in modo tale da poter bilanciare il calore rilasciato dalla polimerizzazione.



Fig. 3.12 reazione esotermica di due differenti tipi di mescola

Trattando del carattere esotermico della polimerizzazione si deve tenere presente che tale processo è accompagnato sempre da un aumento graduale della viscosità. Quando la miscela si trova ancora allo stato liquido i gradienti termici interni sono praticamente inesistenti in quanto il calore generato dall'esotermia viene facilmente smaltito per convezione; ma al progredire della reazione verso lo stato solido-vetroso è molto più facile che si manifestino dei fenomeni di surriscaldamento localizzato, in quanto lo scambio di calore in tali condizioni è possibile solo per la più difficile via conduttiva.

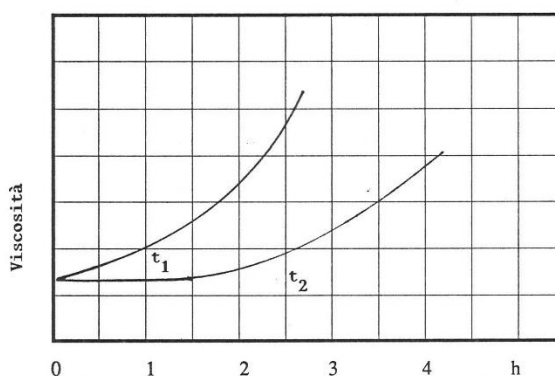


Fig. 3.13 aumento della viscosità durante la polimerizzazione

I moderni sistemi epossidici riescono ad abbassare il picco esotermico di circa 25°C facendo in modo che la reazione del primo 30% dei gruppi epossidici non determini un aumento della viscosità, facilitando così i meccanismi convettivi di smaltimento del calore almeno durante la prima fase della polimerizzazione.

3.1.3. Additivi

Alla mescola di base, costituita dalla resina pura e dall'indurente, possono essere aggiunti vari additivi per conseguire determinate proprietà fisico-meccaniche nel prodotto finale.

Per calcolarne la quantità necessaria si deve fare riferimento al *contenuto epossidico* dei prepolimeri di partenza, il quale può essere espresso in due scale diverse: il *numero epossidico* rappresenta il numero di equivalenti⁷ epossidici in un chilogrammo di resina, il *peso equivalente* indica invece il peso in grammi di una resina che contiene una mole equivalente di gruppi epossidici. Tanto minore è il numero epossidico tanto maggiore è la

⁷ L'*equivalente* è un'unità di misura della quantità di sostanza. A differenza della mole, esso è una quantità, variabile definita di volta in volta in funzione della tipologia di reazione chimica in oggetto. Il numero di equivalenti è comunque sempre un multiplo intero delle moli.

viscosità della resina ad una determinata temperatura. La conversione fra una scala e l'altra si effettua mediante l'equivalenza:

$$\text{peso equivalente (g/mol)} = 1000/\text{numero epossidico (Eq./kg)} \quad (3.8)$$

Questi sono alcuni degli additivi che possono essere combinati alla mescola di base:

- I *flessibilizzanti* aumentano la distanza fra i gruppi epossidici per cui si ottengono sistemi reticolati a maglie più larghe e quindi prodotti più tenaci, con maggiore resistenza alla propagazione delle cricche e agli urti. Quando vengono aggiunti alla mescola di base possono abbassare la T_G anche di decine di gradi. [9]
- I *coloranti* servono a dare al manufatto la tonalità desiderata e si basano su composizioni di ossido di ferro.
- Gli *acceleranti* sono costituiti da ammine e vengono impiegati per aumentare la reattività ed accelerare così la polimerizzazione dei sistemi epossidici, riducendo il tempo complessivo di indurimento. Possono essere impiegati anche per forzare la polimerizzazione a temperature più basse di quelle normalmente necessarie, ma in ogni caso le variazioni rispetto al processo di polimerizzazione con miscela standard sono piuttosto contenute. La dipendenza della velocità di polimerizzazione dalla temperatura può essere ridotta dosando opportunamente questa tipologia di additivo in modo da abbassare l'energia di attivazione del sistema epossidico.

- **Cariche minerali**

Le *cariche minerali* più utilizzate sono:

- il quarzo SiO_2 , ha il miglior rapporto qualità/prezzo
- l'allumina Al_2O_3 , aumenta la resistenza all'arco elettrico
- la wollastonite CaSiO_3 , migliora la resistenza agli shock termici
- l'idrossido di alluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, determina l'autoestinguenza del materiale ma ne peggiora le caratteristiche meccaniche
- il carbonato di calcio CaCO_3 , è solo un riempitivo nel senso che non migliora le qualità tecniche del prodotto finale; il suo grande vantaggio è di non essere abrasivo.

In misura minore sono impiegati anche il biossido di titanio (TiO_2) e l'ossido di zinco (ZnO).

Esse contribuiscono a migliorare i valori di resistenza meccanica alla compressione, nonostante peggiorino la resistenza all'urto; migliorano la conducibilità termica e la resistenza all'invecchiamento e agli agenti atmosferici; abbassano la reazione esotermica e la contrazione volumetrica della polimerizzazione. Per contro aumentano la viscosità della miscela e possono determinare delle sedimentazioni che ne alternano l'omogeneità. L'efficacia della carica dipende dalla forza e dalla natura del legame che la lega al polimero.

Dal punto di vista tecnico, il vantaggio principale correlato all'utilizzo delle cariche minerali è l'abbassamento del coefficiente di dilatazione termica del sistema epossidico. La resina pura ha un coefficiente di dilatazione di circa $200 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$: con una carica al quarzo si abbassa a $35 \div 40 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ mentre con la wollastonite scende a $28 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. È di fondamentale importanza per la resistenza agli shock termici del prodotto finale che i coefficienti di dilatazione termica della mescola e degli elementi metallici incapsulati siano i più simili possibili, in modo tale che il pezzo reagisca alle sollecitazioni termiche come se fosse costituito da un unico materiale. I metalli più utilizzati nel settore degli isolatori sono il rame ($17 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), l'alluminio ($24 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) e l'ottone ($19 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) quindi l'aggiunta della carica, specialmente della wollastonite, ci permette di ridurre la differenza fra i coefficienti di

dilatazione dei materiali e migliorare il comportamento del prodotto finito rispetto agli abbassamenti di temperatura.

La quantità di carica che si può aggiungere dipende dal tipo, dalla granulometria e dalla superficie specifica (m^2/g) della medesima: il limite massimo nei sistemi epossidici è del 60÷65%. È importante sottolineare che né il tipo di carica né la sua quantità hanno influenza sul valore della T_G , anche se dalla misura del calore specifico a pressione costante è possibile risalire alla percentuale di carica impiegata nella miscela. La tipologia e la quantità di carica utilizzata influenza anche le caratteristiche elettriche del prodotto finale, con modalità che verranno approfondite nel prosieguo.

Dal punto di vista economico le cariche servono ad abbassare il costo del sistema epossidico e quindi del prodotto finale: in media il costo della resina è di 4€/kg mentre quello della carica è di 0.10€/kg quindi con una carica al 60% si ottiene un costo del prodotto finale che è il 40% rispetto a quello che si avrebbe impiegando la resina pura.

3.2. TECNOLOGIA DI PROCESSO

3.2.1. Preparazione della miscela

La carica viene prelevata dal deposito per essere essiccata e degassificata sotto vuoto, per garantire un contenuto di umidità inferiore allo 0.2%. In seguito viene smistata in altri due serbatoi di degassificazione, anch'essi sottovuoto, dove confluiscono rispettivamente la resina e l'indurente. Tutti gli elementi della miscela devono essere preriscaldati per diminuirne la viscosità e renderli così più fluidi e facilmente trasportabili.

I degassificatori svolgono la fondamentale funzione di aspirare le bollicine d'aria che rimangono imprigionate durante la preparazione degli impasti, in quanto la presenza di inclusioni gassose inficerebbe inevitabilmente le proprietà elettriche e meccaniche dei prodotti finali. Il processo si realizza mediante un sistema a coclea che preleva la miscela dal fondo del serbatoio e la lascia ricadere più in alto su una superficie conica: in questo modo le inclusioni gassose possono essere facilmente estratte ed eliminate dall'azione della pompa a vuoto.

La fase di preparazione della miscela può durare da trenta minuti a tre ore, dipende molto dalla quantità, dalla temperatura e dall'attrezzatura a disposizione. Il grado di vuoto richiesto dalla degassificazione varia tra 0.5mmbar e 8mmbar, a seconda della pressione di vapore dei componenti della miscela. Il sistema epossidico così preparato può rimanere stoccato al massimo per due giorni a una temperatura inferiore ai 25°C; dopodiché si manifestano fenomeni di sedimentazione e aumento di viscosità.

A questo punto i carrelli di spinta sottovuoto vengono riempiti con le proporzioni corrette di resina e indurente; ad essi vengono aggiunti i coloranti, il flessibilizzante e l'accelerante a seconda delle necessità.

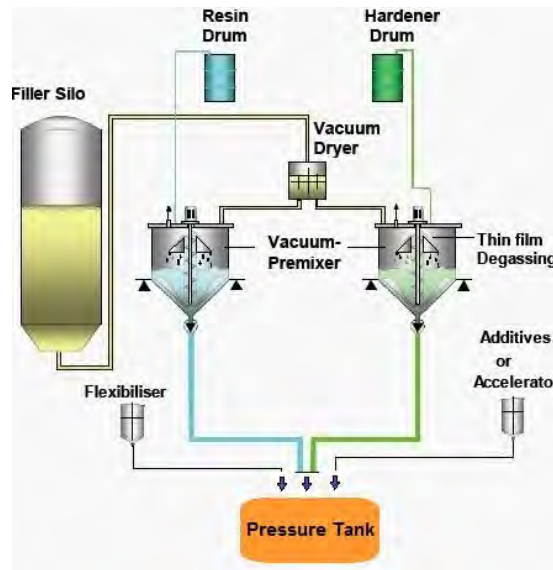


Fig. 3.14 preparazione della miscela

Il rapporto corretto fra resina e indurente è di 100:80; alterarlo comporta un peggioramento delle proprietà del prodotto finale in relazione al comportamento meccanico, al valore della T_G , alla resistenza a trazione e all'assorbimento dell'umidità (Figg.2.15-16-17-18)

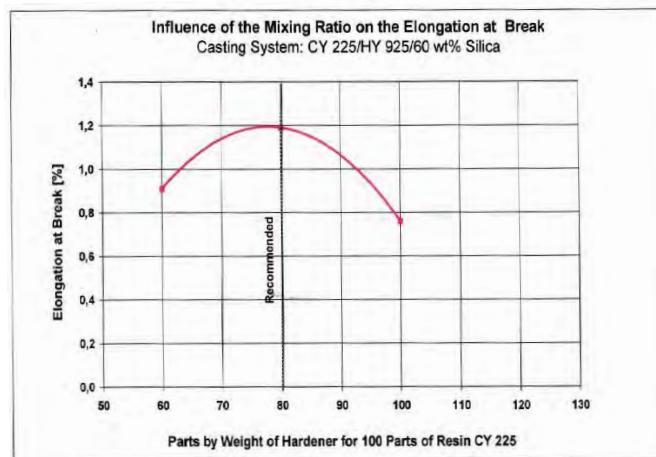


Fig. 3.15 comportamento meccanico al variare del rapporto resina-indurente

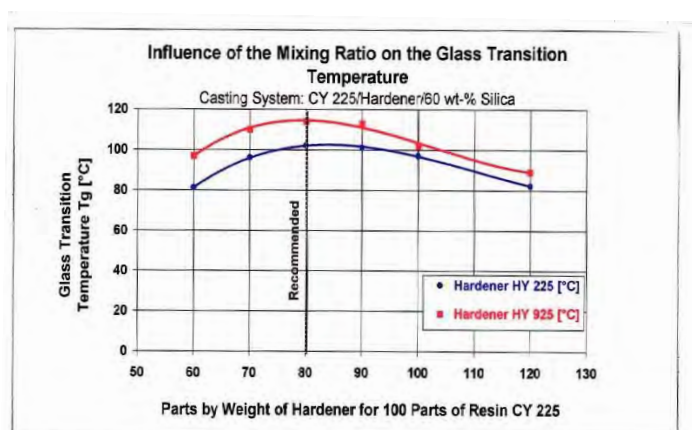


Fig. 3.16 variazione della T_G al variare del rapporto resina-indurente

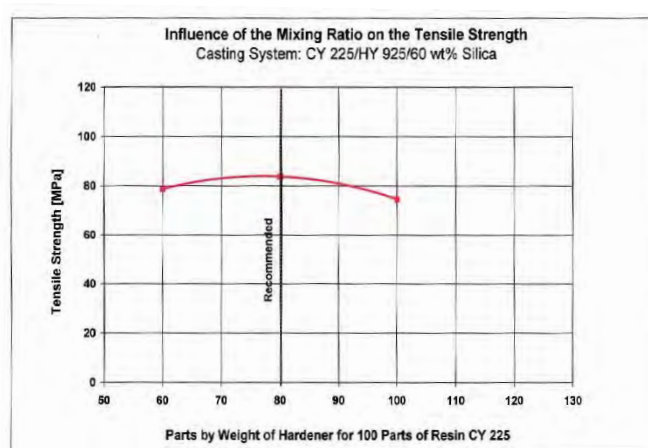


Fig. 3.17 variazione della resistenza a trazione al variare del rapporto resina-indurente

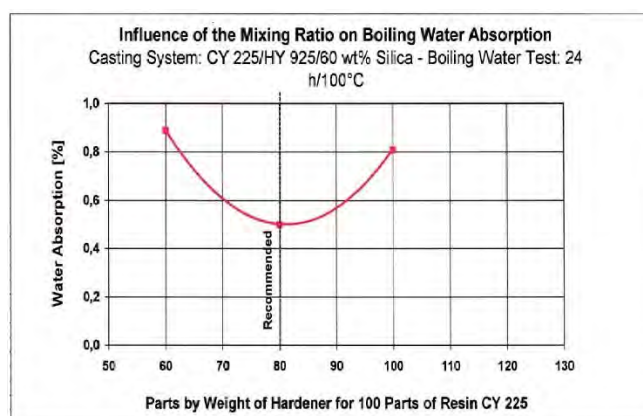


Fig. 3.18 variazione dell'assorbimento d'acqua al variare del rapporto resina-indurente

Tutti i componenti della miscela vengono omogeneizzati grazie all'azione dell'agitatore a palette che è montato all'interno di ciascun carrello di spinta (Fig.3.19).

Questo sistema di preparazione della miscela è molto flessibile, in quanto per ogni riempimento di carrello si possono personalizzare le quantità di additivi utilizzate; ma ha lo svantaggio di far invecchiare il materiale, ovvero di determinarne l'aumento progressivo di

viscosità, cosicché si rende necessario un incremento di pressione per ristabilire la fluidità sufficiente ad corretto stampaggio.

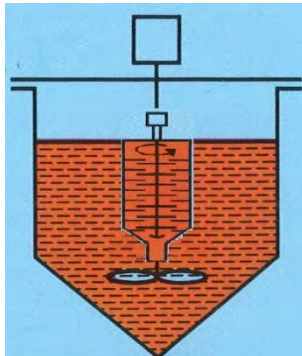


Fig. 3.19 agitatore dinamico montato all'interno del carrello di spinta

3.2.2. Stampaggio

- **Conventional Casting**

La tecnica di stampaggio convenzionale prevede che a valle dei due serbatoi separati in cui la resina e l'indurente, miscelati con la carica, vengono degassificati, ci sia un mixer che prepara la miscela da colare. Tale miscela viene poi colata all'interno di alcuni stampi opportunamente riscaldati a $80\div 90^{\circ}\text{C}$ e collocati all'interno di un autoclave con una pressione di circa 1mmbar. Il processo di stampaggio può durare dalle 5 alle 8 ore, a seconda delle dimensioni del prodotto finale e della temperatura.

Nello stampaggio per colata è possibile modificare l'attrezzatura in modo tale da stampare in atmosfera di esafluoruro di zolfo: in questo modo eventuali inclusioni gassose non comportano più degli scarti al collaudo elettrico.

Questa tecnica è l'unica soluzione possibile quando le dimensioni degli stampi sono rilevanti, ma non consente di compensare il ritiro della resina, per questo la tecnica di stampaggio si è evoluta verso il processo di gelificazione in pressione.

- **Automatic Pressure Gelation (APG)**

Il sistema di colata e gelificazione sotto pressione è il più utilizzato per gli isolatori di media tensione in quanto consente un'elevata automatizzazione della produzione.

La prima operazione del ciclo di processo è costituita dall'attrezzaggio della pressa. Le presse per stampaggio hanno di solito una configurazione orizzontale e vengono classificate sulla base della forza di chiusura generata idraulicamente.

Gli stampi vengono realizzati prevalentemente in alluminio o in acciaio, con una geometria fedele alla figura prevista dal progetto. Nella configurazione minima si compongono di due piastre a cui possono essere aggiunti, a seconda della complessità del prodotto finale, dei tavolini superiori e/o inferiori, nonché svariate altre parti mobili. Nella cavità possono essere posizionati componenti metallici come viti, spine, barre conduttrici, deflettori di campo e armature metalliche in genere. Il singolo stampo può anche ospitare più impronte, in modo tale da poter stampare più di un pezzo per ciclo ed abbassare così il costo di produzione.

Nello stampaggio di polimeri termoidurenti come la resina epossidica, lo stampo viene riscaldato a $130\div 160^{\circ}\text{C}$ per permettere una corretta reazione di curing: la scelta di tale temperatura è determinata dalla T_G della miscela maggiorata di $20\div 30^{\circ}\text{C}$. Inoltre prima di procedere all'iniezione di materiale è necessario lubrificare lo stampo con degli olii specifici che facilitano l'estrazione del pezzo finito.

Il carrello di spinta, opportunamente riempito con la miscela di resina desiderata, viene collegato al sistema della pressa e sottoposto ad una pressione variabile fra 0,5 e 5 bar. A questo punto un cilindro sposta la valvola di iniezione contro lo stampo: la pressione di serraggio è generalmente di almeno 50 kg, ma dipende molto dalla superficie interessata e dalla pressione del processo.

La valvola di iniezione viene azionata mediante un meccanismo strozzatubo non parzializzato: mentre la miscela riempie la cavità dello stampo, l'aria fuoriesce sia dai giunti di stampo sia da apposite fessure di sfogo previste sullo stampo stesso (sfiati).

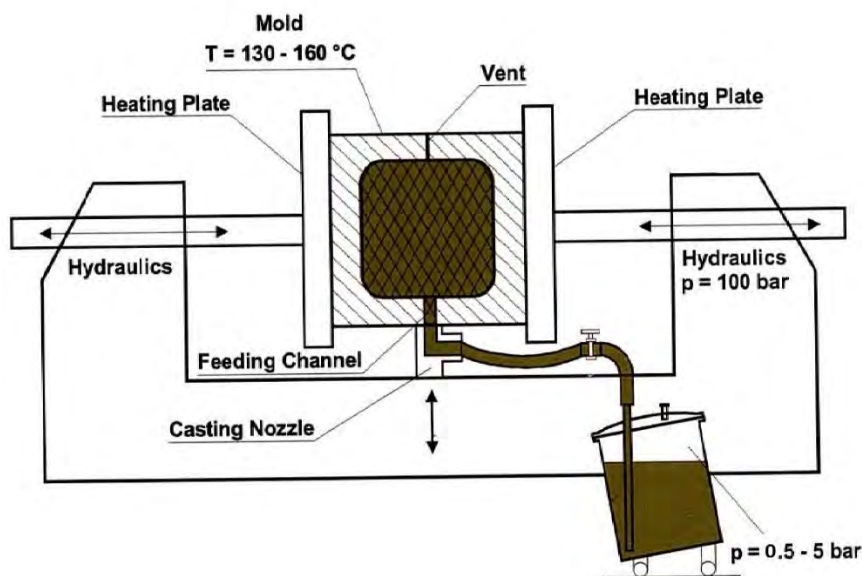


Fig. 3.20 sistema di gelificazione sotto pressione

La miscela rimane sotto pressione nello stampo per un intervallo di tempo compreso fra 12 e 40 minuti, dipendente dal tipo di sistema epossidico impiegato. La temperatura e la pressione agiscono da parametri di controllo e i loro valori ottimali dipendono sia dalla geometria che dal volume del pezzo. Per essere certi di una completa e uniforme gelificazione del volume di resina, il punto di iniezione deve essere l'ultimo ad essere interessato dalla trasformazione in gel, come si può vedere dalla Fig.3.21.

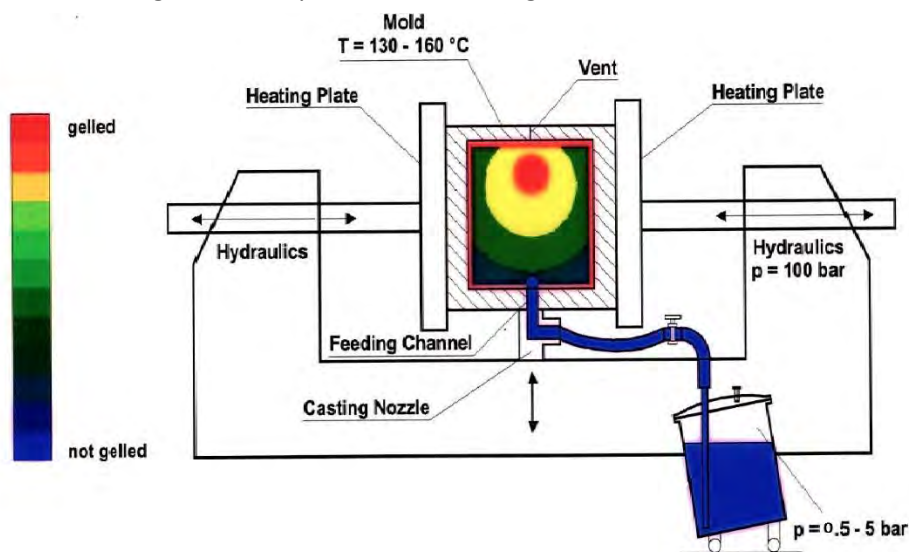


Fig. 3.21 gelificazione durante lo stampaggio

Grazie allo sviluppo progressivo della gelificazione nel processo APG è possibile compensare i ritiri della resina attraverso l'apporto di miscela ancora liquida ed abbassare notevolmente il picco esotermico dovuto alla polimerizzazione, rispetto allo stampaggio convenzionale (Fig.3.22).

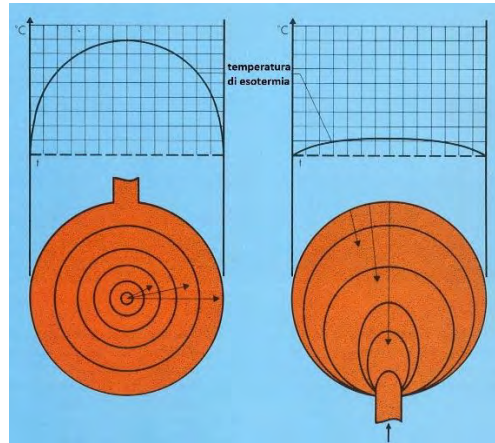


Fig. 3.22 confronto fra la fase di gelificazione in un processo di colata e in un APG

Per queste ragioni il processo APG consente di ottenere un'elevata precisione dimensionale e migliori caratteristiche meccaniche del pezzo finale, in quanto è possibile distribuire uniformemente le tensioni interne attraverso il controllo dei parametri termodinamici della reazione. Dal punto di vista produttivo si ha il vantaggio di una breve immobilizzazione degli stampi e la possibilità di implementare una produzione automatizzata.

Ad ogni modo, il pezzo che viene estratto dallo stampo non è ancora completamente polimerizzato e per completare la reazione di curing viene riscaldato in forno per almeno 4 ore ad una temperatura che deve essere superiore rispetto al valore della T_G di almeno $20 \div 25$ °C. Salire a temperature molto più elevate è controproducente in quanto si fornisce l'energia sufficiente a spezzare alcuni legami e ciò determina il degrado del pezzo finale a partire dalla superficie fino alle parti interne.

3.3. PROPRIETÀ MECCANICHE

Le proprietà meccaniche di un prodotto in resina epossidica non sono importanti solo dal punto di vista della reazione agli stress di tale natura, ma si ripercuotono anche sulle proprietà elettriche del pezzo finale. Infatti maggiori sono le tensioni interne, maggiori sono le possibilità di avere microfessure che porterebbero ad un incremento inaccettabile dei valori di scariche parziali.

I parametri che possono determinare la fessurazione sono:

- Un errato disegno dello stampo o un suo imperfetto riscaldamento che non permette all'iniezione di essere l'ultimo punto in cui la miscela gelifica;
- Una differenza molto elevata fra il coefficiente di dilatazione della resina e dei materiali inglobati;
- La sedimentazione della carica oppure errati rapporti di miscelazione dei componenti;
- Una T_G molto elevata che rende il pezzo particolarmente rigido e fragile (vedasi anche Fig.3.5);
- Il ritiro della resina che non riesce ad essere compensato adeguatamente dai parametri di stampaggio.

3.3.1. Sollecitazione Termomeccanica

Uno dei principali produttori mondiali di sistemi epossidici, la Huntsman⁸, ha messo a punto una prova ad hoc per la misura della resistenza alla sollecitazione termomeccanica dei prodotti realizzati con le sue mescole.

Il campione della prova è costituito da un cubo di materiale metallico 40x40mm con smussi diversi fra loro, che viene inglobato nella resina. Una serie di 20 provini di questo tipo viene sottoposta a un ciclo predeterminato di stress termico, come riportato in Fig.3.23, e per ogni pezzo si registra l'istante di rottura.

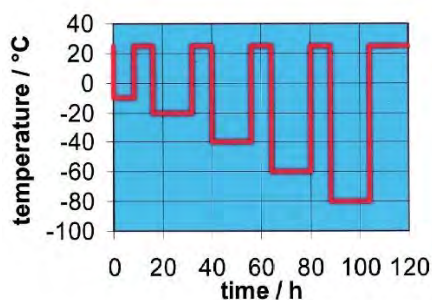


Fig. 3.23 ciclo di stress termico applicato ai campioni

Dalle campagne di misura condotte su set di prova costituiti da mescole e parametri di stampaggio diversi si evince che:

1. Più basso è il valore della T_G , maggiore è la resistenza del provino agli stress termici (Fig.3.24);
2. I campioni realizzati per colata resistono di più rispetto a quelli realizzati con il processo di gelificazione sotto pressione per il fatto che le temperature nello stampo sono più basse e i tempi di immobilizzazione sono più lunghi (Fig.3.25);
3. I migliori risultati in termini di resistenza al cracking si hanno lavorando con resine precaricate con elementi che abbassano il coefficiente di dilatazione termica a valori di $27\div 30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, rendendolo molto più simile a quello del cubo metallico incapsulato. In questo caso i risultati (Fig.3.26: CW 229-3 + HW 229-1) si rivelano indipendenti dalla pressione e dalla temperatura di stampaggio.

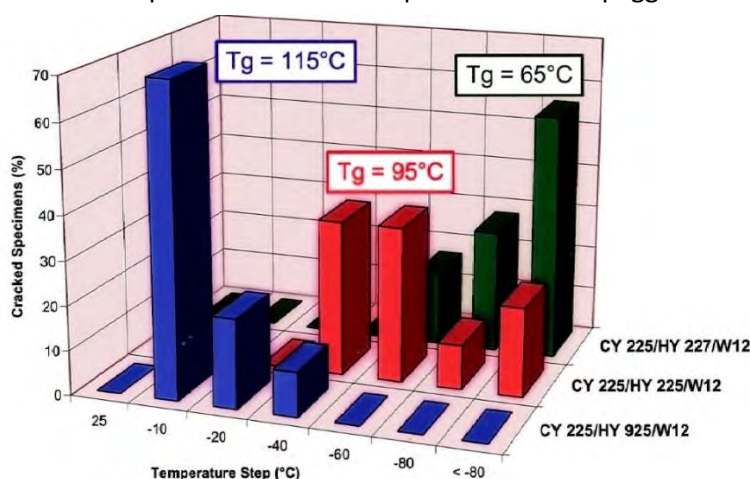


Fig. 3.24 resistenza alla rottura per shock termico al variare della T_G

⁸ ex-Ciba-Geigy

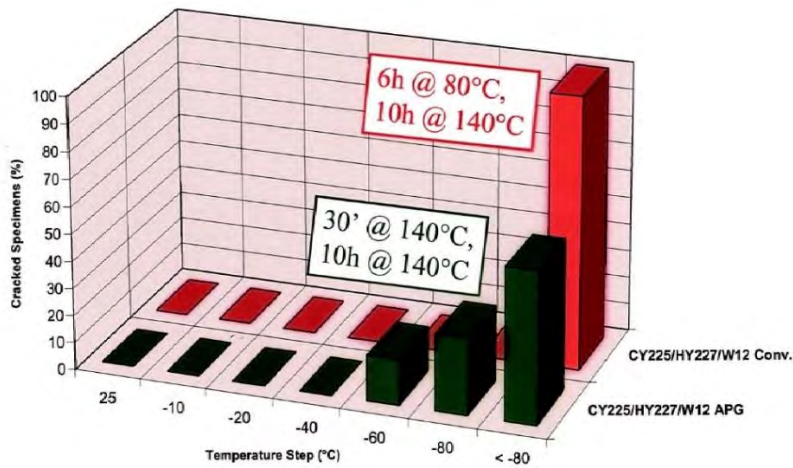


Fig. 3.25 resistenza alla rottura per shock termico al variare del tipo di processo di gelificazione

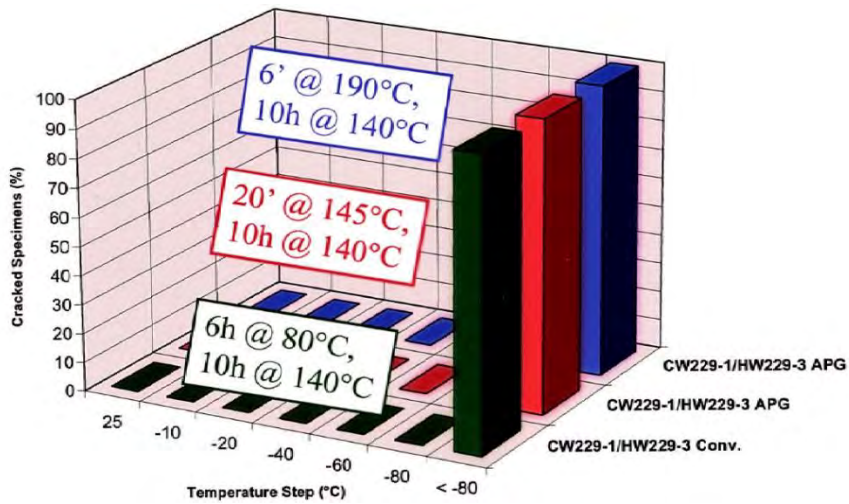


Fig. 3.26 indipendenza dai parametri di stampaggio della resistenza al cracking con resina precaricata ad hoc

3.3.2. Double Torsion Test

Ciascuna miscela Huntsman è sottoposta anche ad un test di resistenza puramente meccanico, senza sollecitazioni termiche, a cui ci si riferisce come *Double Torsion Test*.

Un provino di resina 80x34mm viene sollecitato con le forze evidenziate in Fig.3.27.

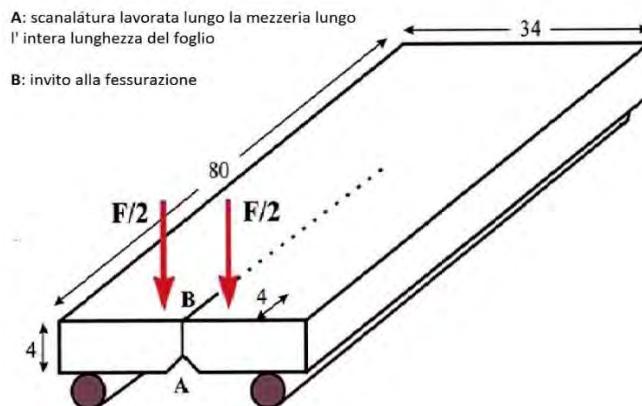


Fig. 3.27 Double Torsion Test

Dal test vengono estrapolati due coefficienti caratteristici della mescola in esame:

- K_{IC} : intensità critica dello stress [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]
- G_{IC} : energia critica per la deformazione [J/m^2]

i quali sono legati dalla relazione:

$$K_{IC}^2 = \frac{E \cdot G_{IC}}{1 - \nu^2} \quad (3.9)$$

dove E è il modulo elastico del materiale e ν è la viscosità.

Dalla Fig.3.28 si evince che più la T_G è elevata più il coefficiente K_{IC} è ridotto, quindi il materiale ha un carico di rottura molto basso. Modificando la mescola con materiali che la rendono più tenace (plot in rosso) è possibile aumentare i valori di K_{IC} a parità di temperatura di transizione vetrosa.

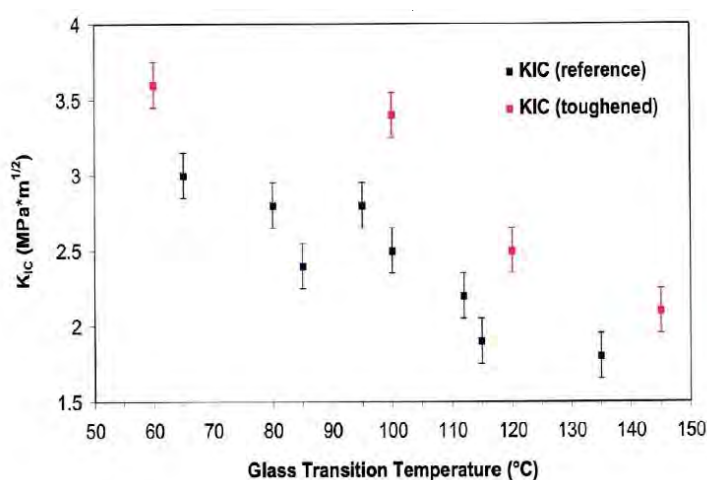


Fig. 3.28 K_{IC} al variare della T_G e della composizione della mescola

3.4. PROPRIETÀ ELETTRICHE

La resina epossidica rappresenta a tutt'oggi uno dei principali materiali di riferimento per l'isolamento elettrico. Un materiale che venga usato come isolante elettrico deve ovviamente avere valori elevati di resistività e di rigidità dielettrica, mentre il fattore di dissipazione deve essere il più possibile contenuto: procediamo ad analizzare queste proprietà.

3.4.1. Costante Dielettrica Relativa e Fattore di Perdita

La costante dielettrica relativa di un materiale rappresenta la sua polarizzabilità sotto l'azione di un campo elettrico esterno (cap.2): i valori tipici per la resina epossidica variano fra 4 e 6. La ϵ_r è legata alla dimensione e alla forma delle molecole, nonché alla loro distribuzione spaziale. In altri termini, la costante dielettrica relativa definisce qual è la capacità di un condensatore che ha lo spazio interelettrodico riempito di resina epossidica, rispetto alla capacità di un condensatore con la stessa geometria e riempito di aria.

Il fattore di dissipazione o $\tan\delta$ rappresenta invece le perdite del dielettrico quando è elettricamente sollecitato (cap.2) ed è quindi correlato al suo aumento di temperatura durante l'esercizio: i valori tipici per la resina epossidica variano fra 0.01 e 0.05. Le perdite dielettriche sono influenzate dal peso molecolare, dai momenti di dipolo, dalla presenza di ioni e dai tempi di rilassamento degli specifici meccanismi di polarizzazione.

Il prodotto $\epsilon_r \cdot \tan\delta$ è proporzionale alla potenza dissipata nel dielettrico che può essere calcolata secondo la formula:

$$P = U^2 \cdot 2\pi f \cdot C_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan\delta \quad (3.10)$$

dove U è la tensione alternata, f è la frequenza, C_0 è la capacità del provino colato sottovuoto. [10]

È auspicabile che la potenza dissipata nel dielettrico sia la minore possibile; tranne nei casi in cui viene sfruttata per riscaldare il materiale stesso con campi elettrici di elevata frequenza.

I valori di ϵ_r e $\tan\delta$ dipendono dalla temperatura e dalla frequenza e mostrano un comportamento particolarmente variabile quando il materiale isolante è di tipo polare.

• Frequenza

Come si può vedere dalla Fig.3.29 la costante dielettrica relativa si mantiene costante fino a $\approx 1\text{MHz}$ e poi decresce all'aumentare della frequenza. Il fattore di perdita invece diminuisce già a valori di frequenza molto bassi e sperimenta dei picchi in corrispondenza dei tempi di rilassamento dei meccanismi di polarizzazione: infatti per una data frequenza del campo esterno risultano impossibili tutti quei movimenti che hanno tempi di rilassamento più lunghi del periodo associato ed esso. [11]

Come si può vedere dalla Fig.3.29, i minimi della ϵ_r coincidono con i massimi del $\tan\delta$, i quali all'aumentare della temperatura si spostano verso frequenze più elevate.

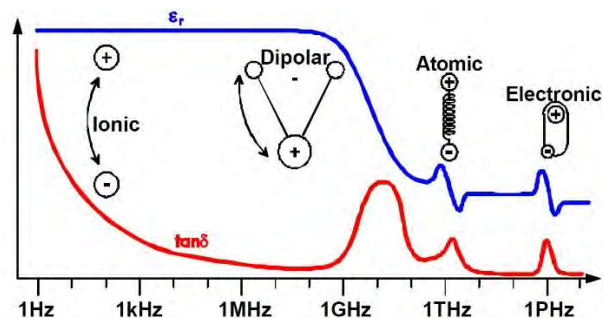


Fig. 3.29 dipendenza di ϵ_r e $\tan\delta$ dalla frequenza

Solitamente sono i gruppi molecolari collegati perpendicolarmente rispetto allo sviluppo longitudinale della catena a contribuire ai meccanismi di rilassamento che determinano l'andamento della ϵ_r e del $\tan\delta$ in funzione della frequenza. A frequenze basse tutti i dipoli della catena polimerica riescono ad orientarsi come il campo applicato, quindi il valore di ϵ_r sarà elevato; tuttavia man mano che la frequenza sale, i dipoli più grandi fanno fatica ad orientarsi seguendo il ritmo del campo elettrico, perciò il loro contributo al valore di permittività relativa diminuirà progressivamente. [12]

• Temperatura

Soprattutto nelle applicazioni dove le correnti in gioco sono elevate, per cui il riscaldamento per effetto Joule è molto marcato, è importante investigare il comportamento di ϵ_r e $\tan\delta$ al variare della temperatura, mantenendo la frequenza del campo elettrico applicato a 50 Hz. [13]

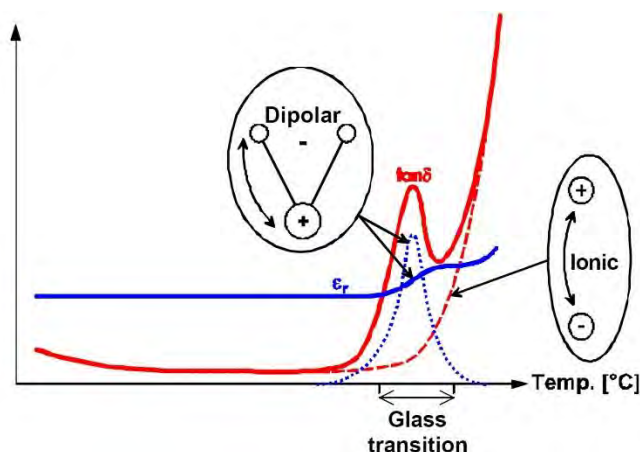


Fig. 3.30 dipendenza di ϵ_r e $\tan\delta$ dalla temperatura

Al valore di $\tan\delta$ ad una specifica temperatura contribuiscono tutti i diversi meccanismi di polarizzazione, di cui la curva in rosso rappresenta la risultante. Per determinare il peso della singola tipologia di polarizzazione nel comportamento globale si deve conoscere anche l'andamento della costante dielettrica complessa al variare della temperatura: nella Fig.3.31 si possono analizzare separatamente gli andamenti della parte reale (marcatore pieno) e della parte immaginaria (marcatore vuoto) della costante dielettrica complessa, a varie temperature di funzionamento (marcatore quadrato: 20°C, marcatore romboidale: 40°C, marcatore triangolare: 60°C)

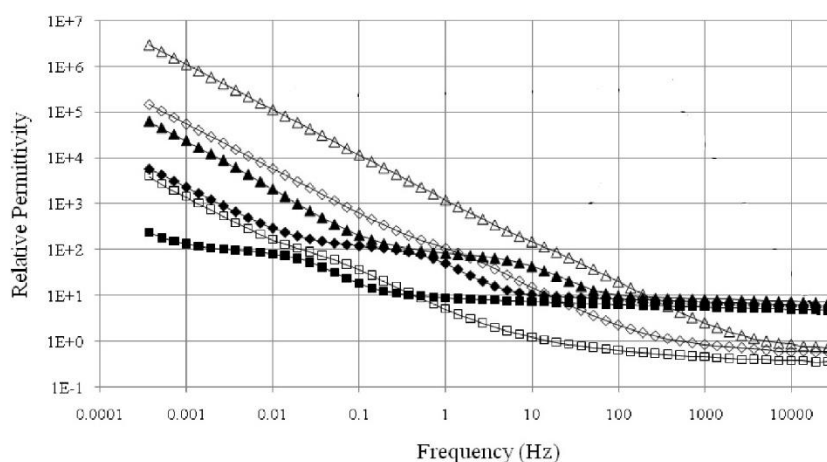


Fig. 3.31 andamento delle parti reale e immaginaria della ϵ_c in funzione della frequenza e della temperatura

- **Intensità del Campo Elettrico**

Il fattore di perdita dipende dall'intensità del campo elettrico applicato solo nei casi in cui esistano meccanismi di conduzione di tipo elettronico. Infatti, i meccanismi di polarizzazione e la conduzione ionica non dipendono dal modulo della sollecitazione elettrica, quindi ne risulta indipendente anche il valore della costante dielettrica relativa. Ciò determina la possibilità di provare l'esistenza di fenomeni di conduzione elettronica studiando il comportamento del fattore di perdita al variare dell'intensità del campo applicato.

La Fig.3.32 mostra l'aumento del $\tan\delta$ che si manifesta per campi elettrici di intensità superiore ai 10 kV/mm sia nel caso di resina pura che di resina caricata con allumina, a diverse temperature di funzionamento.

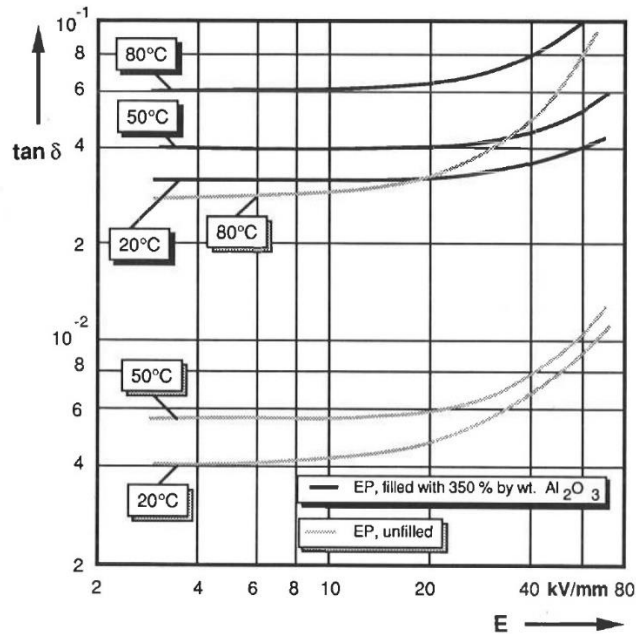


Fig. 3.32 dipendenza del valore di $\tan \delta$ dall'intensità del campo elettrico applicato

- **Composizione del Sistema Epossidico**

La dipendenza della costante dielettrica relativa e del fattore di perdita dalla temperatura e dalla frequenza varia al variare della carica della miscela, sia in termini di granulometria che di specie chimica utilizzata.

Le grane di quarzo attualmente più utilizzate sono la W10 e la W12, aventi dimensioni dell'ordine dei micrometri (10^{-6}). Tuttavia negli ultimi anni è cresciuto l'interesse per l'utilizzo di cariche più fini, con dimensioni dell'ordine dei nanometri (10^{-9}), in quanto i risultati delle ricerche scientifiche - ancora ben lontane dall'avvicinarsi alla dimensione dell'industrializzazione - hanno evidenziato un miglioramento del comportamento alle sollecitazioni elettriche dei prodotti finali. In generale, è emerso che con una carica di granulometria più fine è possibile aumentare la rigidità dielettrica, la resistenza al tracking e all'erosione, l'idrofobicità superficiale e ottenere una diminuzione del fattore di perdita: quindi in teoria con l'utilizzo di nanopolveri si potrebbero avere prodotti più compatti e più resistenti di quelli attualmente disponibili. Gli svantaggi dell'utilizzo di nanofillers emersi finora riguardano la difficoltà di preparare una miscela omogeneamente caricata, il maggiore assorbimento di umidità riscontrato nei prodotti finali e il peggioramento del comportamento agli stress termici. [14] [15]

La Fig.3.33 mostra la variabilità del comportamento di ϵ_r in funzione della frequenza, a temperatura ambiente, per diverse combinazioni di micro (M) e nano (N) fillers di SiO_2 .

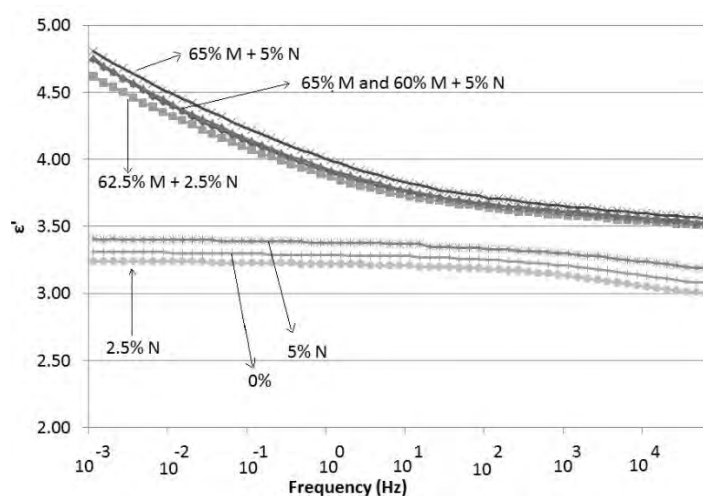


Fig. 3.33 relazione fra frequenza e ϵ_r al variare della composizione della miscela – $T=25^\circ\text{C}$

Per evidenziare come la granulometria della carica influenzi anche la dipendenza della ϵ_r dalla temperatura si confronti la Fig.3.33 con la Fig.3.34a ($-40^\circ\text{C} = 233\text{K}$) e con la Fig.3.34b ($60^\circ\text{C} = 333\text{K}$)

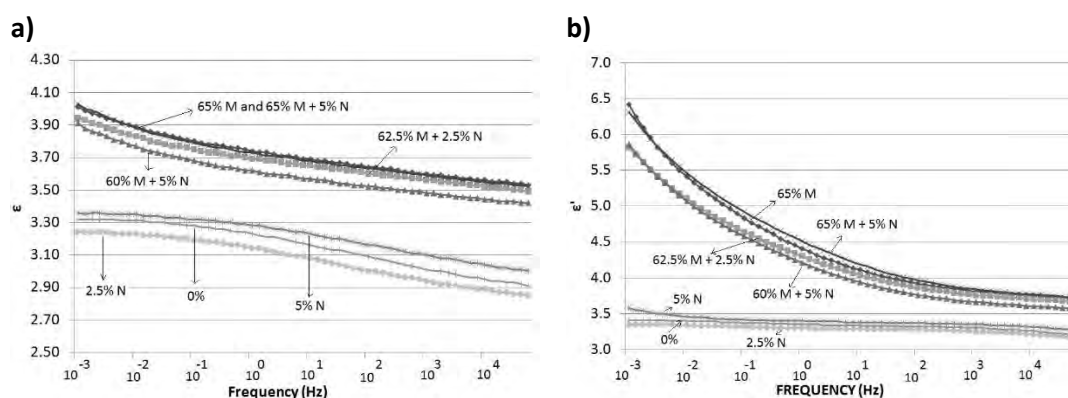


Fig. 3.34 relazione fra frequenza e ϵ_r al variare della composizione della miscela: a) -40°C ; b) 60°C

Si deve tenere presente che il comportamento dielettrico di un sistema eterogeneo come quello in esame è determinato sia dai dipoli permanenti che dagli ioni ed elettroni: l'inclusione di cariche non conduttive, come il quarzo, limita lo spostamento complessivo dei portatori di carica e questo determina gli elevati valori di ϵ_r alle basse frequenze.

Inoltre si può notare che fra i sistemi con soli nanofillers quello caricato al 2.5% ha una costante dielettrica relativa inferiore rispetto alla resina pura, mentre quello caricato al 5% ha un valore di ϵ_r maggiore rispetto a quello del materiale non caricato. Questo comportamento dipende da due cause contrastanti: la ϵ_r della carica è maggiore rispetto a quella della resina pura, ma allo stesso tempo l'interazione fra le nano particelle e la matrice polimerica riduce la mobilità dei portatori di carica. Quando la concentrazione di nanofiller è molto bassa, come nel caso del 2.5%, il secondo fattore prevale sul primo, mentre con il 5% di carica avviene l'opposto.

Per quanto riguarda l'influenza della granulometria della carica sulla dipendenza del $\tan\delta$ dalla frequenza e dalla temperatura, si ottengono risultati analoghi a quelli già discussi per la ϵ_r : i grafici della Fig.3.35 si riferiscono alla temperatura ambiente (a), a -40°C (b), a 60°C (c).

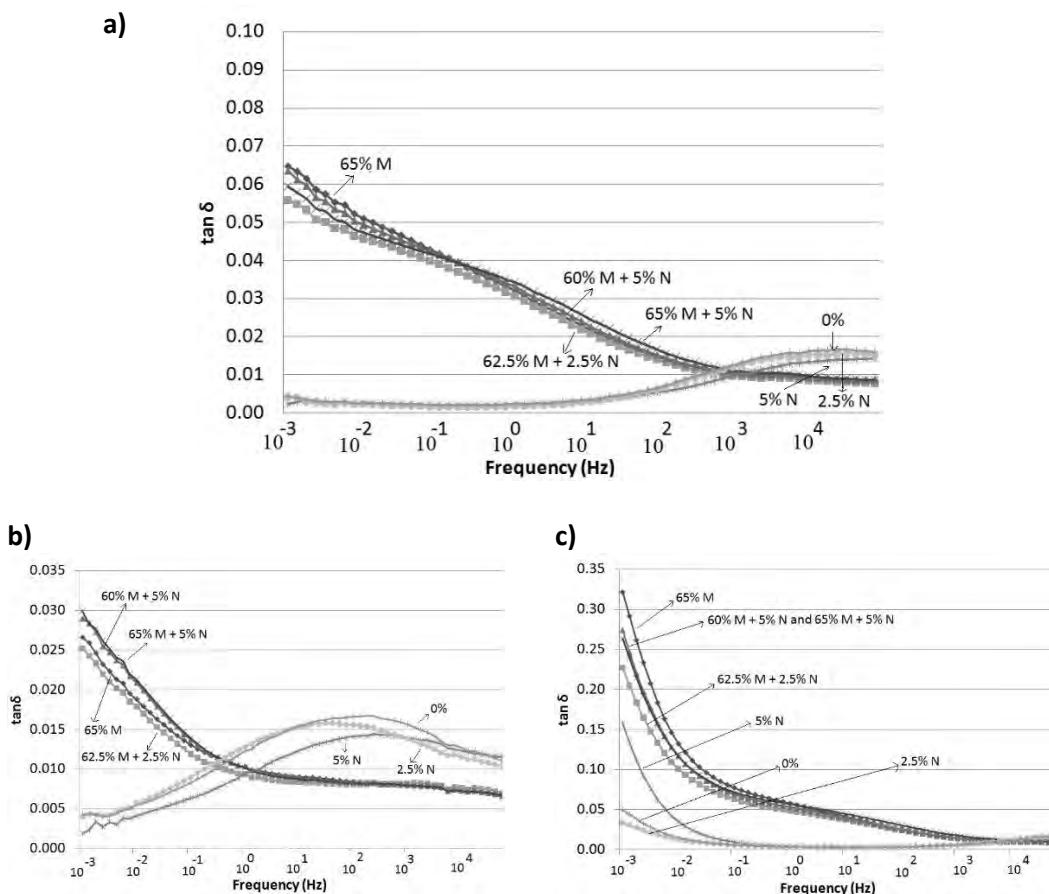


Fig. 3.35 relazione fra frequenza e $\tan\delta$ al variare della composizione della miscela:
 a) $T=25^{\circ}\text{C}$; b) $T=-40^{\circ}\text{C}$; c) $T=60^{\circ}\text{C}$

I valori molto più bassi della costante dielettrica e del fattore di perdita dei campioni caricati solamente con nano particelle è dovuto al loro elevato rapporto superficie/volume che determina aree interfacciali più ampie e quindi una limitazione maggiore alla mobilità delle cariche.

Anche la scelta del processo di polimerizzazione incide sulla dipendenza dei valori di ϵ_r e di $\tan\delta$ dalla temperatura. Come si evince dalla Fig.3.36, in corrispondenza della temperatura di Martens⁹ (θ_M) sia la costante dielettrica relativa che il fattore di perdita aumentano quasi con andamento esponenziale per tutti i tipi di polimerizzazione: questo prova che vi è un'intima correlazione fra le proprietà elettriche e meccaniche del prodotto finale e che l'aumento delle perdite è dovuto alla polarizzazione per orientamento dei segmenti costituenti le catene polimeriche. Comparando i diversi processi di polimerizzazione si può notare che quanto più la temperatura di Martens – e quindi la T_G – è elevata, tanto più i valori di ϵ_r e di $\tan\delta$ rimangono costanti all'aumentare della temperatura.

⁹ La temperatura alla quale, sotto quattro punti di carico, una barra di polimero devia da un valore specificato. Per i polimeri amorfi la temperatura di Martens è di circa 20°C inferiore rispetto alla temperatura di transizione vetrosa.

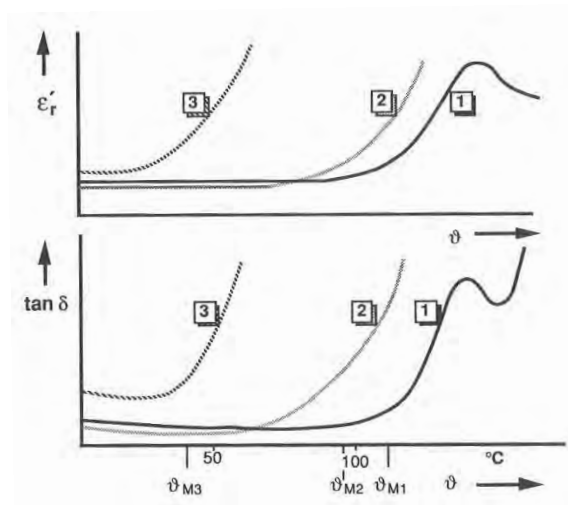


Fig. 3.36 influenza del tipo di polimerizzazione sulla dipendenza tra ϵ_r e $\tan \delta$ dalla temperatura

- **Tensioni meccaniche interne**

Gli stress meccanici interni sono spesso inevitabili quando si producono dei sistemi isolanti per stampaggio, in particolar modo quando è richiesto l'inglobamento di parti metalliche che hanno un coefficiente di dilatazione termica molto diverso rispetto a quello della mescola (cap.3.3). Le sollecitazioni interne al pezzo possono essere sia di trazione che di compressione e possono aggravarsi se l'isolatore è sottoposto a sbalzi termici importanti. [16]

Dalla Fig.3.37 si può notare che gli sforzi di trazione spostano i picchi nell'andamento del $\tan \delta$ verso temperature più basse, mentre gli sforzi di compressione agiscono in maniera opposta, a parità di frequenza. Inoltre a parità di temperatura, gli sforzi di compressione fanno aumentare il valore di ϵ_r mentre quelli di trazione ne determinano la riduzione. Questi comportamenti possono essere spiegati ricordando che uno sforzo di compressione compatta le catene polimeriche e aumenta così la frequenza naturale dei dipoli.

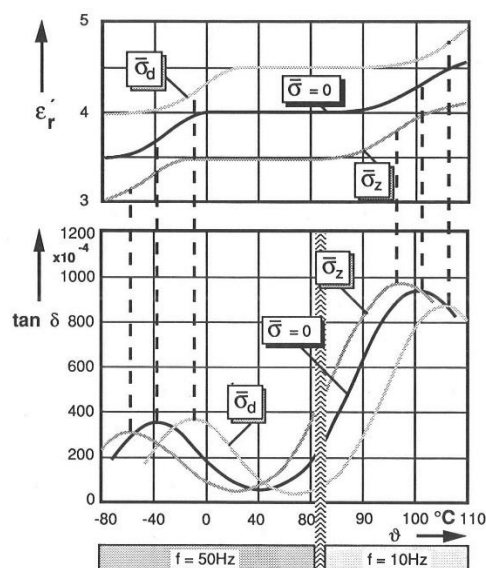


Fig. 3.37 influenza degli stress meccanici di trazione e compressione sulle proprietà elettriche

- **Assorbimento dell'Umidità**

Un sistema isolante ha contenuto di umidità nullo nel momento in cui viene estratto dallo stampo, date le temperature elevate e la pressione a cui è stato sottoposto. Tuttavia con il passare del tempo la resina assorbe l'umidità dall'aria con cui si trova a contatto che penetra dalla superficie fino alle parti interne.

Se il sistema epossidico è costituito solamente dalla resina e dall'indurente, il contenuto di umidità nel pezzo finale non ha effetto sui valori della costante dielettrica relativa e sul fattore di perdita perché l'acqua non reagisce chimicamente con questi elementi. Il comportamento cambia quando si aggiunge alla miscela di base la carica al quarzo: essa infatti contiene delle impurità elettrolitiche come calcio, magnesio, ferro e alluminio che vengono dissociate dalle molecole di H₂O e ciò determina il peggioramento delle proprietà dielettriche, in modo tanto più marcato quanto più lo spessore di resina è ridotto (Fig.3.38a). L'umidità assorbita si concentra nelle superfici di separazione fra la matrice polimerica e i grani di carica, enfatizzando gli effetti della polarizzazione interfacciale e aumentando così i valori di ϵ_r e di $\tan\delta$ (Fig.3.38b). [17]

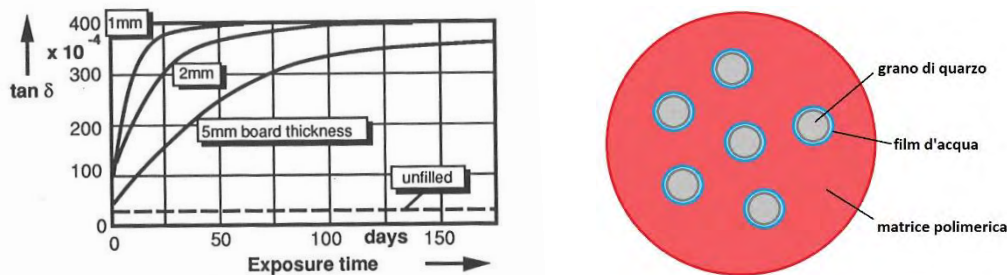


Fig. 3.38 a) effetto dell'assorbimento di umidità sul fattore di perdita al variare dello spessore del campione
b) deposito del film d'acqua sulle superfici di separazione grano-matrice polimerica

Per ridurre l'effetto peggiorativo della presenza della carica minerale nel sistema epossidico è consigliabile trattarla preventivamente con processi a temperatura elevata. Infatti se si forza una serie di reazioni chimiche fra il quarzo e le impurezze metalliche che le rende non più dissociabili dall'acqua, il valore di $\tan\delta$ si abbassa, a parità di condizioni operative. [18]

Un altro metodo che può essere utilizzato per pretrattare la carica di SiO₂ è la *silanizzazione*. Questo processo fa in modo che le particelle di quarzo perdano il loro carattere idrofilo e che quindi le caratteristiche dielettriche del sistema epossidico caricato risultino indipendenti dall'umidità assorbita.

Dalla Fig.3.39 si vede che la silanizzazione è più efficace del trattamento a temperature elevate.

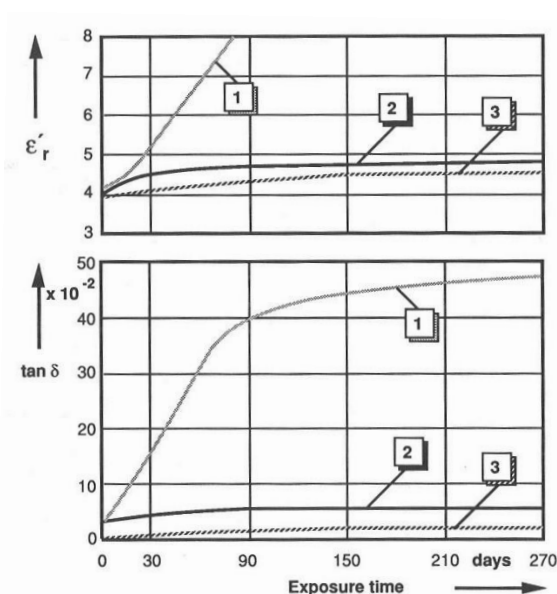


Fig. 3.39 effetto sulle proprietà dielettriche dei diversi trattamenti della carica al quarzo:
1) non trattata 2) silanizzata 3) essiccata a 1000°C

3.4.2. Rigidità dielettrica

La rigidità dielettrica è definita dal rapporto fra la tensione di scarica e la distanza fra gli elettrodi e si esprime solitamente in kV/mm: non rappresenta una costante del materiale in quanto dipende da molti fattori che verranno esaminati nel prosieguo.

Il valore della rigidità dielettrica è legato innanzitutto dalla durata della sollecitazione, applicata, come si vede dalla Fig.3.40:

1. *Intrinsic Breakdown*: cedimento dell'isolante dovuto a fenomeni legati al comportamento degli elettroni. Si manifesta in tempi che vanno dai nanosecondi alle frazioni di secondo con meccanismi diversi che comportano il collasso diretto del materiale, pur senza causare variazione delle caratteristiche chimico-fisiche essenziali.
2. *Thermal Breakdown*: si manifesta quando la sollecitazione elettrica determina un deterioramento del materiale isolante sotto l'aspetto delle proprietà termiche. La scarica avviene con campi applicati molto minori dei precedenti a causa di una differenza di velocità di accumulo e smaltimento del calore nel corpo del dielettrico, oppure di una variazione di conducibilità del materiale per effetto di elevate temperature di esercizio, oppure ancora per l'effetto del calore determinato dalle perdite dielettriche.
3. *Erosion Breakdown*: per durata della sollecitazione elettrica dell'ordine di mesi o anni, la scarica avviene per campi applicati ancora minori, in seguito al degrado fisico-chimico del materiale oppure agli effetti erosivi delle scariche parziali, aggravati dalla presenza di inclusioni gassose.

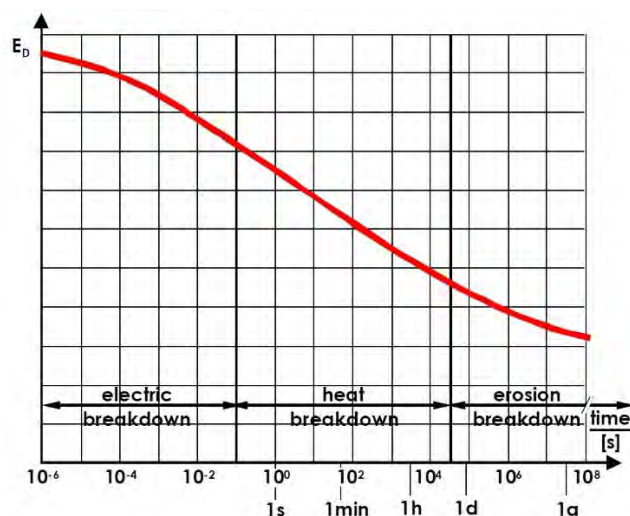


Fig. 3.40 dipendenza della rigidità dielettrica dal tempo di applicazione della sollecitazione

I risultati delle prove di rigidità dielettrica, qualsiasi sia la configurazione degli elettrodi o la forma d'onda applicata, mostrano una certa dispersione. Per questo motivo occorre ripetere la misura su un numero consistente di campioni e da essi estrapolare un valore "nominale" da riferirsi al materiale. Potremmo utilizzare come ipotesi statistica la ben nota distribuzione di Gauss; tuttavia essa non è quella più adatta allo scopo dato che prevede probabilità di scarica finite anche con tensioni applicate nulle, non ha alcun termine che tenga conto dell'effetto delle dimensioni e del volume del dielettrico sollecitato, inoltre presenta una simmetria rispetto al valore medio che raramente si riscontra nelle prove dielettriche. La distribuzione statistica che meglio si accorda con i dati sperimentali è quella di Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\lambda}\right)^k} \quad (3.11)$$

dove $F(x)$ rappresenta la probabilità di avere per la variabile valori minori di x , x_0 rappresenta il valore della variabile aleatoria corrispondente a probabilità nulla, λ è il parametro di posizione, k è il parametro di forma. Il valore nominale ottenuto con la distribuzione di Weibull ha il 63.2% di probabilità di essere verificato.

- **Tenuta intrinseca**

Il cedimento intrinseco di un dielettrico ha origine dalla presenza di difetti nel materiale come disomogeneità, impurità, cricche microscopiche, interfacce estese fra matrice polimerica e carica minerale. La scarica comincia quando gli elettroni liberi vengono accelerati dall'applicazione del campo elettrico esterno, non incontrando ostacoli aumentano esponenzialmente per effetto di una ionizzazione a valanga e alla fine determinano il cedimento del dielettrico. Dato che nel corpo degli isolatori i difetti sono distribuiti statisticamente, aumentando il volume del corpo isolante aumenta la probabilità di avere dei punti critici e quindi la rigidità dielettrica diminuisce.

Un altro aspetto di cui occorre tenere conto quando si caratterizza la rigidità dielettrica di un materiale isolante è il grado di uniformità del campo elettrico applicato durante la prova: infatti se si adottano configurazioni particolari che uniformano la distribuzione di campo nel dielettrico, la rigidità avrà valori molto più elevati rispetto a quelli che è possibile garantire nelle geometrie reali.

La norma IEC 60243¹⁰ specifica le dimensioni del provino e la configurazione degli elettrodi da adottare per la prova della rigidità dielettrica. A causa dell'effetto combinato del volume e della disuniformità di campo che si manifesta nelle applicazioni reali, il valore calcolato secondo norma è molto più elevato rispetto al 3÷5kV/mm riscontrabile nella pratica per la resina epossidica.

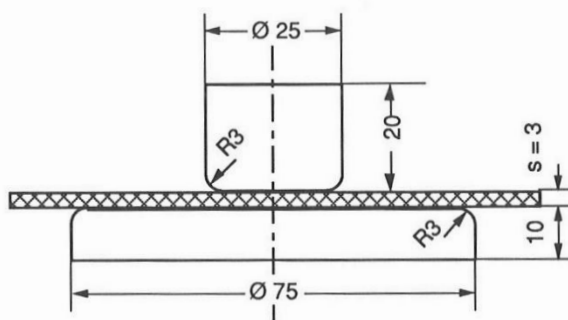


Fig. 3.41 configurazione elettrodi secondo IEC 60243

L'elettrodo in tensione è quello di diametro 25mm, mentre quello collegato a terra ha diametro 75mm; gli spigoli di entrambi sono smussati con un raggio di 3mm, uguale allo spessore del provino. La prova viene effettuata immergendo l'intera configurazione in olio dielettrico (Fig.3.41).

Dall'analisi dei risultati sperimentali ci si rende conto che questa configurazione di prova non è quella ottimale quando si tratta di caratterizzare un materiale dielettrico solido. Infatti si riscontra che le tracce della scarica non interessano il volume compreso fra i due elettrodi ma si addensano in una corona circolare attorno ad essi. Questo è dovuto allo sviluppo di scariche streamer determinate dalla presenza di zone di distacco fra l'elettrodo e il dielettrico in questione, le quali vengono riempite dall'olio avente rigidità dielettrica minore rispetto alla resina epossidica. In una situazione di questo tipo la tensione di scarica misurata può essere influenzata più dalle caratteristiche del mezzo isolante esterno che dal materiale in esame. Si consideri la tensione V^* applicata all'olio dielettrico ad una distanza x dall'asse della configurazione di prova (Fig.3.42), essa è data da:

$$V^* = \frac{d_1}{d_1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot d_2} \cdot V \quad (3.12)$$

dove V è la tensione applicata, d_1 e d_2 sono gli spessori dei materiali isolanti alla distanza x , ε_1 ed ε_2 sono le rispettive costanti dielettriche relative.

¹⁰ IEC 60243 Electric strength of insulating materials – Test Methods – Part1: Test at power frequencies

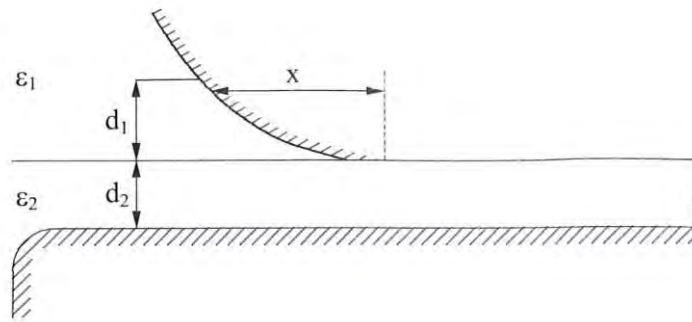


Fig. 3.42 sollecitazione elettrica sul punto triplo

Nel nostro caso il dielettrico esterno è olio ($\epsilon_1 = 2.2$), il provino è in resina ($\epsilon_2 \approx 4$) quindi $\epsilon_1 < \epsilon_2$ perciò il mezzo ambiente è sottoposto ad una sollecitazione media maggiore rispetto a quella a cui è sottoposto il mezzo in prova. Inoltre l'olio dielettrico scaricherà ben prima che sia raggiunta la rigidità dielettrica del campione in resina epossidica, formando un canale che depositerà sul punto di contatto una carica spaziale intensa e concentrata che determina una forte distorsione del campo elettrico locale.

Allo scopo di evitare questo fenomeno le disposizioni sperimentali utilizzate dai principali produttori di resina epossidica prevedono l'inglobamento degli elettrodi all'interno del provino.

La prima disposizione utilizza una coppia di elettrodi sferici distanziati di soli 0.5mm (Fig.3.43a): tale configurazione realizza la più uniforme distribuzione di campo possibile e quindi il valore di rigidità dielettrica misurata è più vicino a quello intrinseco. Tuttavia in questa situazione la porzione di dielettrico sollecitata elettricamente è molto limitata; se si volesse investigare il comportamento di un volume maggiore di materiale isolante si può utilizzare la configurazione Rogowski (Fig.3.43b)

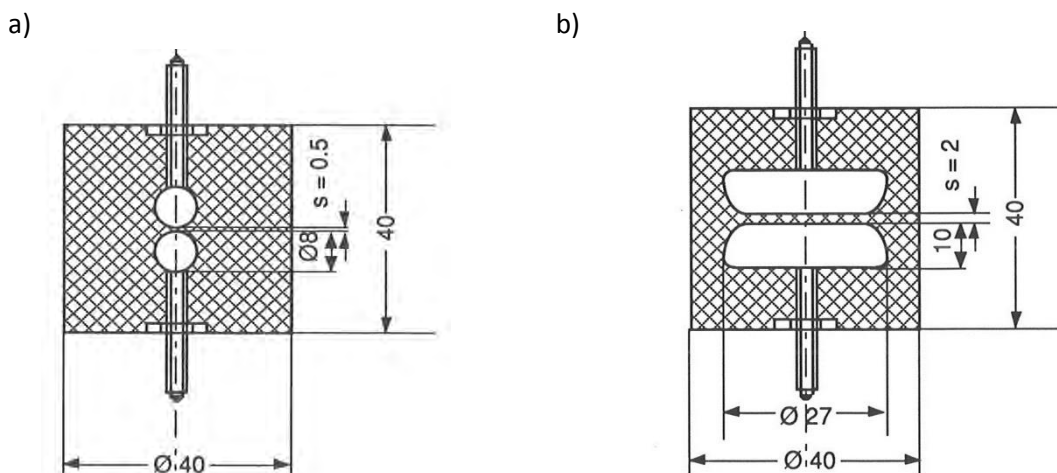


Fig. 3.43 configurazioni con elettrodi inglobati in resina: a) sferici b) configurazione Rogowski

Per confronto si riportano in Tab.3.2 i valori di rigidità dielettrica ricavati con diverse configurazioni elettrodeiche sullo stesso materiale (resina Araldit® CY184; indurente Aradur® HY1235; accelerante DY 062; quarzo silanizzato).

IEC 60243	18-20 kV/mm
Elettrodi incapsulati – sferici	55-60 kV/mm
Elettrodi incapsulati – Rogowski	40-45 kV/mm

Tab. 3.2 valori di rigidità dielettrica al variare della configurazione di prova

Anche la forma d'onda della tensione applicata influenza la rigidità dielettrica del materiale. Per questo si distinguono almeno due tipi di sollecitazione, riportati anche nella norma IEC 60243:

1. Una tensione che sale in maniera continuativa con una pendenza scelta in modo tale da causare la scarica del provino entro 10-20 secondi → *breakdown voltage*
2. Una tensione che sale a gradini di durata e ampiezza predeterminata, fino alla scarica del provino → *withstand voltage*

Anche le condizioni ambientali come temperatura, pressione e umidità influenzano la tenuta intrinseca dielettrica di un materiale isolante, per questo sarebbe buona norma indicarle insieme ai risultati della prova.

In Fig.3.44 è riportato l'andamento della rigidità dielettrica nominale in funzione della temperatura per provini in resina pura e provini caricati al quarzo, in una configurazione ad elettrodi sferici. La Fig.3.44a si riferisce ad una prova effettuata con una tensione che sale in maniera continua, la Fig.3.44b riporta invece i risultati di una prova con tensione che aumenta a gradini.

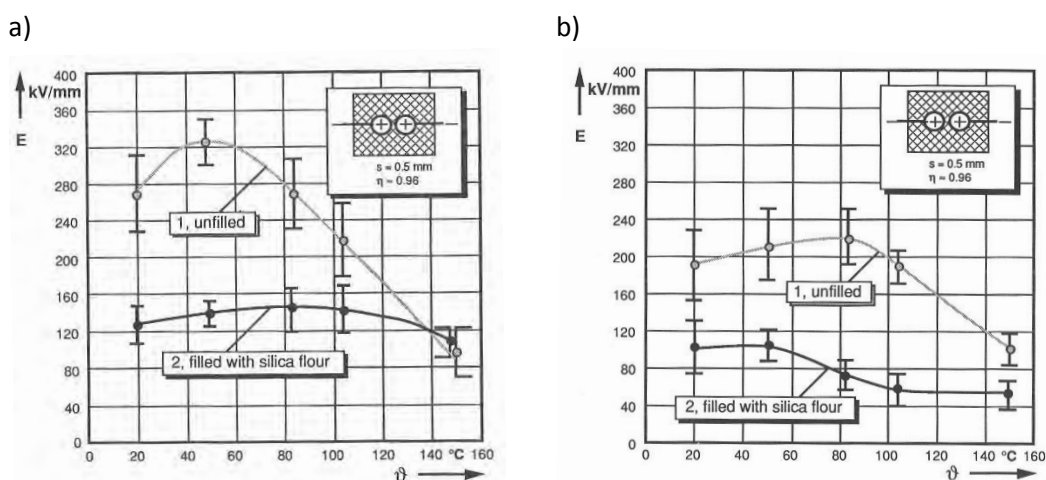


Fig. 3.44 dipendenza della rigidità dielettrica dal tipo di tensione applicata: a) a rampa b) a gradino

Si può notare che la prova con tensione a rampa determina valori di rigidità dielettrica superiori rispetto a quelli riscontrabili nella prova con tensione a gradino in tutto il campo di temperatura. Il profilo dei risultati relativi ai campioni in resina non caricata manifesta un evidente punto di massimo con entrambi i tipi di sollecitazione elettrica; tale picco è meno pronunciato per quanto riguarda i campioni caricati al quarzo.

In ogni caso, a parità di condizioni di prova, un provino a cui è stata aggiunta una carica minerale scaricherà a tensioni più basse rispetto ad uno di resina pura, in quanto i grani agiscono come difetti del dielettrico. Ad ogni modo è stato dimostrato sperimentalmente che né la specie chimica della carica né la sua granulometria influenzano in maniera significativa il valore di rigidità dielettrica (Fig.3.45). [19]

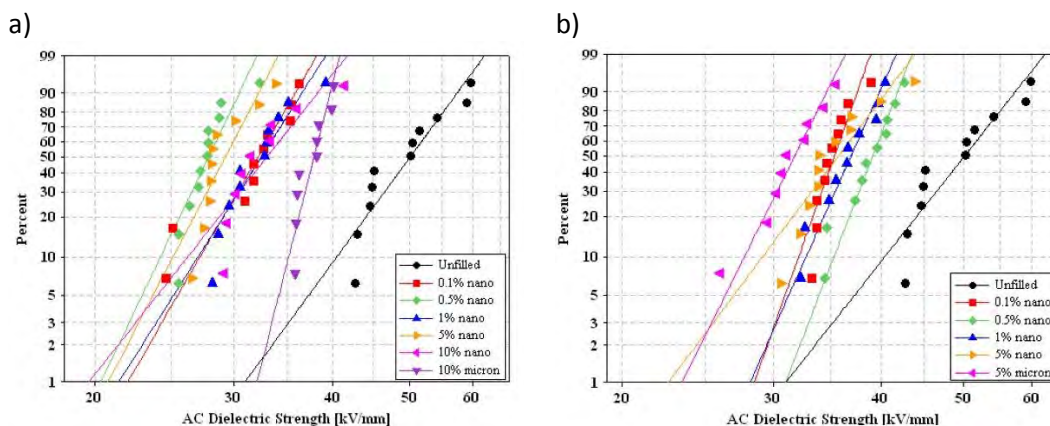


Fig. 3.45 distribuzioni di Weibull per la determinazione della rigidità dielettrica in funzione della granulometria della carica: a) AlO_3 b) SiO_2

• Invecchiamento termo-chimico

La rigidità dielettrica a lungo termine, in particolar modo per i dielettrici organici, è funzione della storia delle sollecitazioni elettriche, meccaniche e termiche a cui è stato sottoposto l'isolamento durante la sua vita. Nelle situazioni pratiche il cedimento di un dielettrico solido può essere dovuto a fenomeni differenti, anche non strettamente elettrici, che comportano la necessità di utilizzare l'isolante con campi applicati ben lontani dai valori di tenuta intrinseca, i quali restano validi solo nelle condizioni sperimentali particolarmente controllate e sofisticate precedentemente analizzate.

In condizioni di funzionamento normale infatti, ogni dielettrico è sede di perdite che innalzano la temperatura interna e ciò può determinare delle alterazioni chimico-fisiche che ne peggiorano le performances. Nelle resine epossidiche le forme di degrado più pericolose sono rappresentate dalla depolimerizzazione, dall'ossidazione, dalla plastificazione e dall'incrinatura. [20]

La norma di riferimento per quanto riguarda il comportamento dei materiali isolanti in merito agli stress termici prolungati nel tempo è la IEC 60216¹¹: dato che i tempi necessari ad una prova con valori nominali delle sollecitazioni sarebbero inaccettabilmente lunghi, questo standard fornisce le prescrizioni riguardanti la corretta esecuzione delle prove accelerate. Lo scopo di una prova accelerata è di raccogliere in tempi ragionevoli dei dati che consentano di prevedere il comportamento del dielettrico sottoposto a stress più contenuti ma prolungati nel medio-lungo termine: è essenziale condurla in modo tale da non introdurre meccanismi di invecchiamento che non esisterebbero con i valori nominali della sollecitazione.

La norma IEC 60216 prevede tre diversi parametri di monitoraggio dell'invecchiamento di un materiale: la rigidità dielettrica, la perdita di peso e la resistenza alla flessione.

Per quanto riguarda la rigidità dielettrica, la norma prevede che si valuti da una prova che sollecita una serie di almeno 5 provini con una tensione costante e che per ognuno si registri il tempo a cui avviene la scarica. Successivamente i dati raccolti vengono elaborati secondo la distribuzione di Weibull e si realizza un grafico bilogarithmico che relaziona il campo elettrico applicato e il tempo alla scarica: tracciando il prolungamento della retta ottenuta con i dati sperimentali si può prevedere il comportamento del dielettrico in un arco di tempo più lungo.

¹¹ IEC 60216 Electrical insulating materials – Thermal endurance properties

La legge empirica su cui si basa l'estrapolazione dei dati può essere espressa dalla relazione:

$$E^N \cdot t = costante \quad (3.13)$$

dove E è il campo elettrico applicato, N è il coefficiente di vita e il valore $-1/N$ rappresenta la pendenza della retta sul grafico bilogaritmico: elevati valori di N corrispondono a pendenze ridotte quindi ad una vita utile del dielettrico più lunga.

Dalla Fig.3.46 di evince che la rigidità a medio termine dei sistemi in resina epossidica si riduce all'aumentare della temperatura in maniera più marcata negli intervalli da 20°C a 50°C e fra 105°C a 150°C. Nell'intervallo di temperature di esercizio comprese fra 50°C e 105°C il materiale si ammorbidisce localmente per effetto dell'accelerazione dei portatori di carica ad opera del campo elettrico applicato; infatti l'aumento di energia cinetica si riflette in un innalzamento localizzato di temperatura che può superare i valori della T_G e determinare un rammollimento del materiale. L'ammorbimento localizzato mitiga l'effetto peggiorativo sulla tenuta dielettrica dei difetti del materiale ed è per questo che in tale range di temperature la rigidità mantiene valori pressoché costanti. A temperature superiori questo effetto mitigativo perde efficacia in quanto aumenta la conduttività ionica che porta il provino alla scarica.

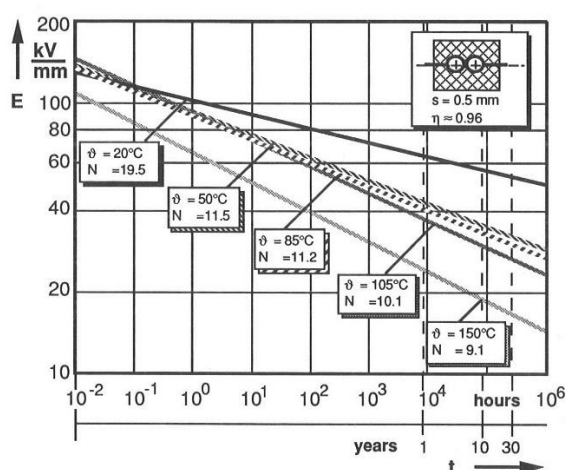


Fig. 3.46 andamento della rigidità dielettrica in funzione della temperatura

I risultati fin qui esposti sono stati estrapolati da prove di rigidità condotte con l'utilizzo di una coppia di elettrodi sferici completamente annegati nel campione. La norma IEC 60216 prevede però che la configurazione elettrodica debba essere quella indicata dalla norma IEC 60243-1 di cui si è già discussa l'inadeguatezza nel caso della resina. Per questo le schede tecniche dei sistemi epossidici riportano i dati riguardanti la resistenza agli stress termici in termini di perdita di peso o di diminuzione della resistenza flessionale.

Se si decide di monitorare l'invecchiamento del materiale attraverso la misura della perdita di peso si considera come durata vita del dielettrico l'intervallo di tempo che porta questo parametro a ridursi del 4% (Fig.3.47a). Se invece si preferisce valutare la riduzione della resistenza a flessione nel tempo, si considererà il materiale definitivamente compromesso quando questo parametro si ridurrà del 50% (Fig.3.47b).

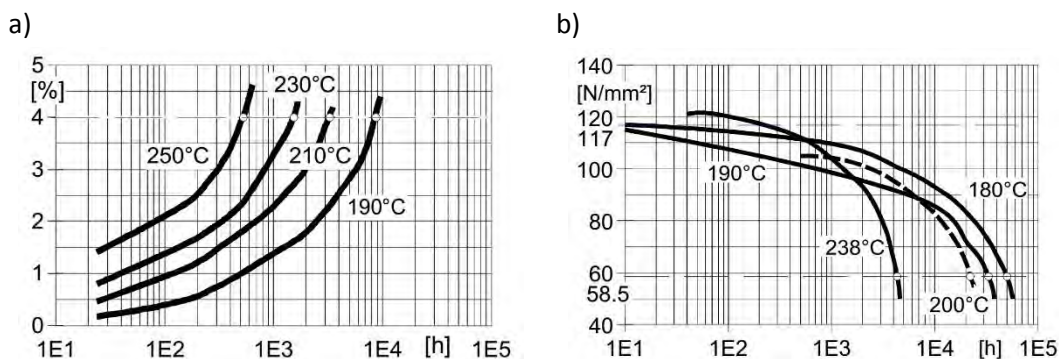


Fig. 3.47 monitoraggio del materiale attraverso: a) la perdita di peso; b)

In entrambi i casi si estrapola il TI (*Temperature Index*) valutando la temperatura di esercizio che consente al dielettrico di garantire una vita utile di 20000 ore (circa 2 anni). Ovviamente questa non potrà essere la temperatura di esercizio mantenuta nelle condizioni reali in quanto la durata di vita richiesta nel settore elettromeccanico è di almeno 30 anni; tale parametro serve solo a confrontare agevolmente tipologie diverse di isolanti solidi. Il TI calcolato dalla valutazione della perdita di peso viene ridotto all'aumentare della carica minerale della mescola, mentre se lo si valuta a partire dalla resistenza flessionale si riscontra un comportamento opposto. Altri studi hanno evidenziato che non esiste nessuna correlazione fra il valore del TI e il valore della T_G . [21]

Il valore di TI costituisce anche la base della classificazione di materiali isolanti secondo la massima temperatura di funzionamento, come stabilito dalla norma IEC 60085¹². Le resine epossidiche vengono associate alla classe B a cui corrisponde una T_{MAX} di 130°C.

- **Scariche Parziali**

La diminuzione della rigidità dielettrica a lungo termine dipende principalmente dal manifestarsi dei fenomeni di scariche parziali. Negli isolatori realizzati in resina epossidica la presenza di cricche, microcavità e fessurazioni è pressoché inevitabile: difetti di questo tipo possono essere determinati sia in fase di produzione, sia a seguito di eccessive o prolungate sollecitazioni termiche e meccaniche. Queste zone critiche sono normalmente riempite di un mezzo liquido o gassoso con rigidità dielettrica più bassa rispetto alla resina epossidica; inoltre la costante dielettrica relativa di questi mezzi è spesso inferiore a quella del solido quindi, dato che il campo elettrico si ripartisce in maniera inversamente proporzionale ai valori di ϵ_r , si ha un'intensificazione del campo medio proprio all'interno delle cavità. Di conseguenza quando l'isolatore è sottoposto alla normale tensione di esercizio, il campo nella cavità può facilmente superare il valore di rigidità dielettrica del mezzo ivi contenuto e produrre una scarica parziale. [22]

È possibile studiare il comportamento elettrico dei vuoli del dielettrico attraverso la schematizzazione di Fig.3.48a:

¹² IEC 60085 Electrical insulation – Thermal evaluation and designation

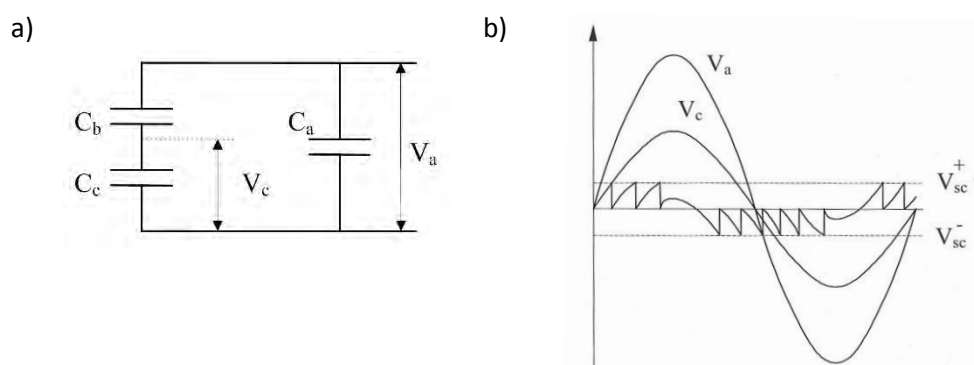


Fig. 3.48 schematizzazione elettrica del fenomeno delle scariche parziali

dove C_c è la capacità dell'occlusione gassosa, C_b è la capacità del dielettrico in serie alla cavità, C_a è la capacità della restante parte del dielettrico.

Quando il dielettrico è sollecitato da una tensione sinusoidale, la tensione all'interno del vacuolo si mantiene proporzionale a quella d'alimentazione fintanto che non viene raggiunto il valore V_{sc}^+ . Per tale valore di tensione mezzo contenuto nella cavità non è più in grado di sostenere la sollecitazione elettrica e sviluppa una scarica che annulla il valore di tensione ai capi del vacuolo. A questo punto il processo può terminare o proseguire a seconda dei prodotti chimici sviluppatasi durante la scarica. Se infatti tali prodotti presentano residui carboniosi o comunque conduttivi, la superficie della cavità diviene conduttrice costituendo un cortocircuito che estingue definitivamente i fenomeni di scarica nell'occlusione. Se invece i prodotti chimici sono di natura isolante o sono presenti in quantità modesta, la situazione si riporta allo stato originale e nella cavità la tensione ricomincia a crescere in funzione della derivata prima della tensione di alimentazione. In questo secondo caso la scarica può ripetersi più volte per ciclo a seconda del rapporto esistente tra tensione del vacuolo e tensione di scarica dello stesso, anche nella semionda negativa della tensione di alimentazione (Fig.3.48b).

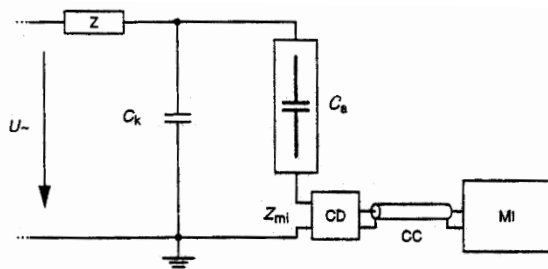
Nel processo di scarica, le estremità del vacuolo si possono considerare come un anodo ed un catodo attraverso i quali vi è uno spostamento di carica. È possibile che l'energia sviluppata da tale spostamento, unita ad un inevitabile innalzamento termico e conseguente modifica delle condizioni ambientali, possa essere sufficiente a rompere i legami chimici alle pareti del vacuolo. Oltre a ciò, il "bombardamento elettronico" del catodo da parte di ioni positivi e dell'anodo da parte di elettroni rende disponibili dei reagenti che possono combinarsi con le molecole costituenti il dielettrico principale, peggiorandone le proprietà isolanti.

Alla modifica chimica del dielettrico si devono sommare i fenomeni di erosione meccanica che aumentano il volume della cavità interessata dalle scariche parziali: essi vengono indicati come fenomeni di "treeing" e verranno approfonditi in seguito.

Nella pratica le brusche variazioni di tensione che avvengono ai capi del vacuolo interessato dalle scariche parziali non sono rilevabili, in quanto sono molto modeste e sovrapposte ad una tensione elevata. Tuttavia i fenomeni di questo tipo determinano la comparsa di impulsi di corrente che, per la loro breve durata, si richiudono preferibilmente sulle capacità in parallelo al dielettrico in esame. Da tali impulsi, attraverso il circuito di misura definito dalla norma IEC 60270¹³ (Fig.3.49), si ricava il valore della carica apparente in picocoulomb (pC): essa è definita come la carica che, iniettata in brevissimo tempo tra i terminali dell'oggetto

¹³ IEC 60270 High voltage test techniques – Partial discharge measurements

in prova, darebbe luogo alla stessa lettura sullo strumento di misura dell'impulso di corrente di scarica parziale, non direttamente rilevabile. Perciò di fatto il valore della carica apparente si definisce per confronto con una carica campione iniettata ai capi del circuito di prova in sede di calibrazione: il suo valore non rappresenta la carica messa in gioco dalla scarica parziale ma la carica che sarebbe necessario applicare ai terminali dell'oggetto in prova per avere nello strumento di misura la medesima indicazione.



Dove:

- C_k è il condensatore di accoppiamento collegato in parallelo rispetto all'oggetto in prova C ,
- Z_m è l'impedenza di ingresso del sistema di misura M_i ,
- Z è il filtro installato al lato alta tensione,
- C_c è il sistema di trasmissione,
- C_D è il dispositivo di accoppiamento.

Fig. 3.49 circuito di misura delle scariche parziali secondo IEC 60270

La sorgente di alimentazione in alta tensione deve avere un rumore di fondo sufficientemente basso da consentire la misura dell'ampiezza specificata di scariche parziali e può essere ulteriormente ridotto con la presenza di un filtro apposito.

Il condensatore di accoppiamento costituisce la via preferenziale per la richiusura degli impulsi di corrente, perciò deve essere progettato con bassa induttanza ed essere privo di fenomeni significativi di scariche parziali.

Il dispositivo di accoppiamento è costituito da un quadripolo che converte gli impulsi di corrente in ingresso in segnali di tensione in uscita. Tali segnali vengono trasmessi allo strumento di misura per mezzo di un sistema di trasmissione costituito o da un cavo di connessione o da un collegamento ottico.

La risposta dello strumento di misura è un impulso di tensione con un valore di cresta proporzionale alla carica dell'impulso di ingresso. La forma, la durata e il valore di cresta di tale impulso di uscita sono determinati dall'impedenza di trasferimento del sistema stesso, perciò questi parametri in uscita possono essere completamente diversi rispetto a quelli d'ingresso. Gli impulsi in uscita possono essere presentati su una base di tempo lineare, oppure su una base di tempo sinusoidale sincronizzata con l'alimentazione, oppure ancora su una base ellittica che ruota in sincronismo con la frequenza della tensione di prova.

La prova dell'intensità delle scariche parziali deve essere eseguita obbligatoriamente per tutti gli isolatori passanti e in molte altre applicazioni rappresenta un'utile verifica della correttezza del processo produttivo. I risultati della prova sono caratterizzati da una soglia di innesco, definita come la minima tensione a cui la carica apparente diventa maggiore rispetto al valore di riferimento (procedendo per tensioni crescenti), e da una soglia di estinzione, definita come la minima tensione a cui la carica apparente diventa minore rispetto al valore di riferimento (procedendo per tensioni decrescenti). In questo modo è possibile garantire l'assenza di scariche, alla tensione di esercizio prevista, anche qualora fossero state innescate da una sovratensione.

3.4.3. Resistenza al treeing

Il fenomeno del treeing si manifesta quando i materiali dielettrici sono interessati da fenomeni di scariche parziali sufficientemente intensi da causarne un'erosione "fisica" interna. Sperimentalmente si è riscontrato che, in presenza di elettrodi appuntiti o di cavità

riempite di elementi con rigidità dielettrica inferiore rispetto a quella del dielettrico principale, si sviluppano delle scariche ramificate che possono portare al cedimento completo dell'isolamento. [23]

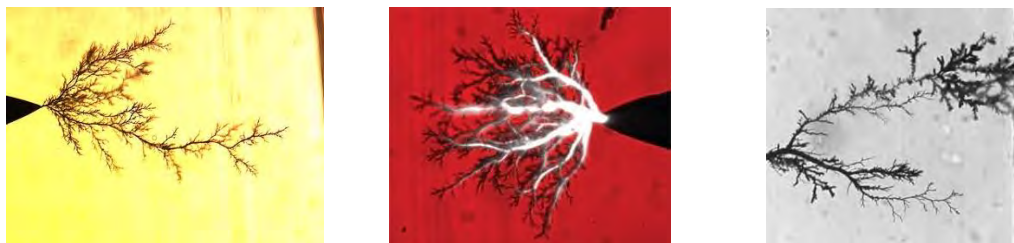


Fig. 3.50 esempi del fenomeno di treeing

Il meccanismo che determina il fenomeno del treeing non è del tutto noto. Si ritiene che localmente abbia luogo un'iniezione di carica per effetto dell'intensificazione del campo elettrico e che successivamente la destabilizzazione di questa carica intrappolata nella matrice polimerica provochi le microscariche con cui il fenomeno del treeing avanza e si ramifica all'interno del dielettrico non autoripristinante.

Nelle prime fasi del treeing le ramificazioni sono dei tubuli vuoti, i quali vengono interessati da residui carboniosi molto conduttivi al persistere delle scariche parziali. Il fenomeno di conduzione nelle ramificazioni è determinato da una serie di scariche successive di intensità inferiore al picocoulomb; solo quando il canale di prescarica è abbastanza sviluppato si registrano sporadicamente valori di decine e centinaia di pC.

Gli effetti del treeing dipendono molto dall'entità dello stress elettrico. Se il campo elettrico è piuttosto intenso, le scariche parziali determinano la perforazione del dielettrico in tempi dell'ordine di alcuni minuti; se invece il campo elettrico non è troppo elevato si manifesta un'erosione progressiva della cavità che potrà protrarsi senza grosse conseguenze per tempi relativamente lunghi, contribuendo all'invecchiamento del materiale. Lo sviluppo delle ramificazioni può essere accelerato da variazioni molto rapide della tensione come le sovratensioni di manovra e le fulminazioni; nonché dall'aumento dei valori di picco determinati da un eccessivo contenuto armonico. [24]

I fenomeni di treeing possono essere categorizzati sulla base dell'estensione e della forma complessiva delle ramificazioni: si possono avere percorsi dendritici, di tipo diramato, a cespuglio, a punta, filamentari ... i più comuni sono quelli indicati come "bow-tie trees" e "vented trees".

I "bow-tie trees" si sviluppano simmetricamente verso gli elettrodi, partendo da un vacuolo presente all'interno del dielettrico. Dato che in questo caso il treeing ha un'origine completamente interna all'isolamento, non c'è un apporto esterno d'aria ad alimentare le scariche parziali, perciò la crescita dei canali di prescarica è molto discontinua ed è difficile che un fenomeno di treeing di questo tipo determini il cedimento completo dell'isolamento. I "vented trees" si sviluppano invece in corrispondenza delle interfacce elettrodo-isolante-aria e possono determinare velocemente un guasto per cortocircuito fra gli elettrodi.

Attualmente l'unico modo per monitorare l'attività di treeing prima che determini il cedimento dell'isolamento è il confronto fra i valori di scariche parziali misurate in accettazione e quelli presenti sull'isolamento dopo un certo periodo di esercizio.

Il treeing implica una conversione di energia dalla forma elettrostatica ad una fisica/chimica, perciò la resistenza di un materiale a questo fenomeno dipende da molti fattori. Le reazioni che possono interessare un sistema chimicamente complesso come quello della resina

epossidica sono molto varie: alcune di esse possono essere positive, ad esempio l'energia liberata da una scarica parziale può perfezionare la polimerizzazione e migliorare la resistenza del materiale ad ulteriori scariche; altre sono negative, come il cedimento termico locale determinato dall'effetto Joule sui residui carboniosi che si depositano nelle ramificazioni. La composizione del sistema epossidico ha quindi un ruolo di primaria importanza nello sviluppo del fenomeno del treeing. [25]

Sperimentalmente è stato evidenziato che principali parametri di influenza sono:

- Dimensione e forma della carica
- Qualità dell'interfaccia fra la matrice polimerica e la carica
- Assorbimento di umidità

Si indica come tensione di innesco del fenomeno di treeing quel valore per cui la lunghezza massima delle ramificazioni supera i $10\mu\text{m}$: i valori tipicamente riscontrabili per la resina epossidica sono compresi fra 5kV e 6kV. È stato sperimentalmente evidenziato che un sistema epossidico caricato al quarzo abbassa leggermente la soglia di innesco del treeing rispetto alla resina pura, ma ne limita fortemente lo sviluppo spaziale prevenendo il cedimento del dielettrico. I grani di carica agiscono come ostacoli alla propagazione delle ramificazioni perché le interfacce che si creano con la matrice polimerica determinano un "rilassamento" del gradiente elettrico: la presenza del quarzo aumenta sensibilmente il numero di diramazioni del treeing e quindi l'energia delle microscariche si ripartisce su un dominio più ampio, rendendo più difficile l'avanzare dell'erosione verso gli elettrodi (Fig.3.50).

Utilizzando il quarzo silanizzato questi effetti sono ancora più evidenti, come si evince dalla Fig.3.51. [26]

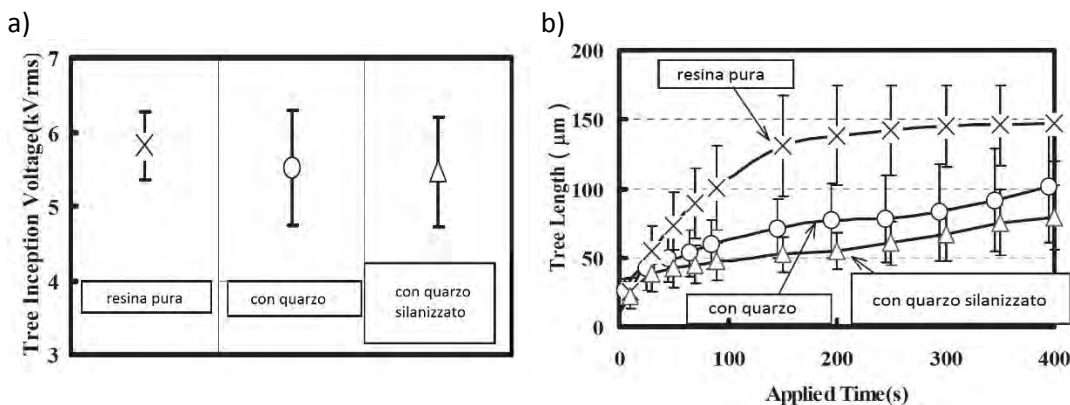


Fig. 3.51 influenza della carica sul fenomeno di treeing: a) tensione d'innesco ; b) lunghezza delle ramificazioni

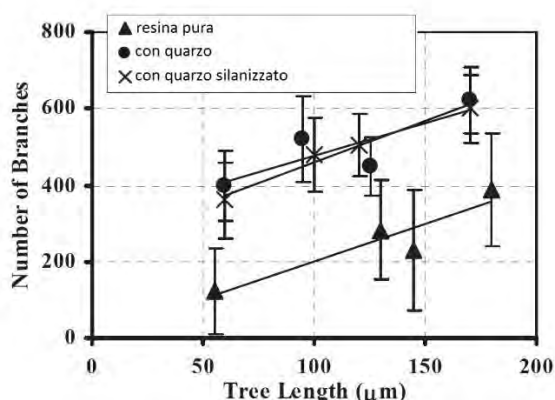


Fig. 3.52 effetto della carica al quarzo sul numero di ramificazioni

La riduzione della tensione di innesco e della lunghezza delle ramificazioni è ancora più marcata se si utilizzano grani di quarzo di forma arrotondata e non squadrata, come si vince dalla Fig.3.53.

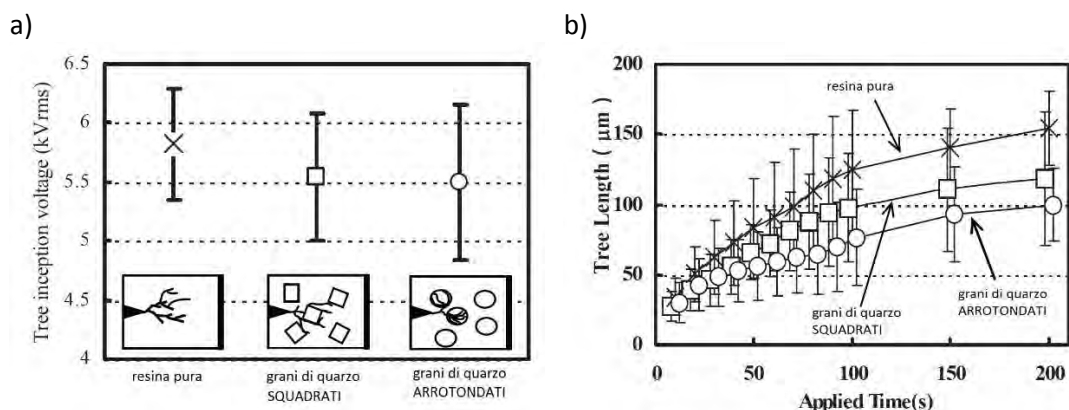


Fig. 3.53 influenza della forma della carica sul fenomeno di treeing:

a) tensione d'innesco ; b) lunghezza delle ramificazioni

I risultati fin qui riportati fanno riferimento ad una carica di dimensioni micrometriche; attualmente sono in corso diverse ricerche che hanno l'obiettivo di stabilire se l'impiego di nanofillers potrebbe migliorare il sistema epossidico anche riguardo al fenomeno del treeing (vedasi 3.4.1).

Non sono solo le dimensioni e la forma della carica a influenzare il fenomeno del treeing, ma anche la qualità dell'interfaccia con la matrice polimerica svolge un ruolo fondamentale. È stato dimostrato che sussiste una correlazione molto stretta fra la resistenza al taglio dell'interfaccia e il tempo necessario alla scarica completa. Infatti per propagarsi nel dielettrico la ramificazione dovrà disporre di un'energia tanto maggiore quanto più forte è il legame fra quarzo e matrice polimerica: se la sollecitazione elettrica esterna rimane costante ciò si traduce in un tempo di scarica più lungo e quindi in una minor probabilità di cedimento del dielettrico durante la sua vita utile. Quando due materiali come il quarzo e la resina epossidica vengono miscelati, sono le forze di legame ad essere responsabili della resistenza al taglio dell'interfaccia: sperimentalmente è stato verificato che la maggior resistenza alla propagazione del treeing viene offerta dai legami di tipo idrogeno e covalente, mentre le forze di van der Waals sono poco performanti in questo senso. La miscelazione e la reazione di curing del sistema epossidico devono essere estremamente accurate per garantire la

maggiore resistenza al treeing possibile perché in questo modo si evita la presenza di sedimentazioni di carica e di zone non correttamente polimerizzate. [27]

Il terzo ed ultimo parametro di influenza del fenomeno del treeing è l'assorbimento di umidità: la presenza di acqua nel sistema epossidico ne riduce la rigidità dielettrica (vedasi 3.4.2) e indebolisce i legami d'interfaccia, aumentando di conseguenza la velocità di propagazione delle ramificazioni e possibilità di scarica dell'isolatore. L'effetto mitigativo dell'aggiunta di carica al quarzo rispetto allo sviluppo del treeing viene mantenuto anche in condizioni di umidità, come di vede in Fig.3.54. [28]

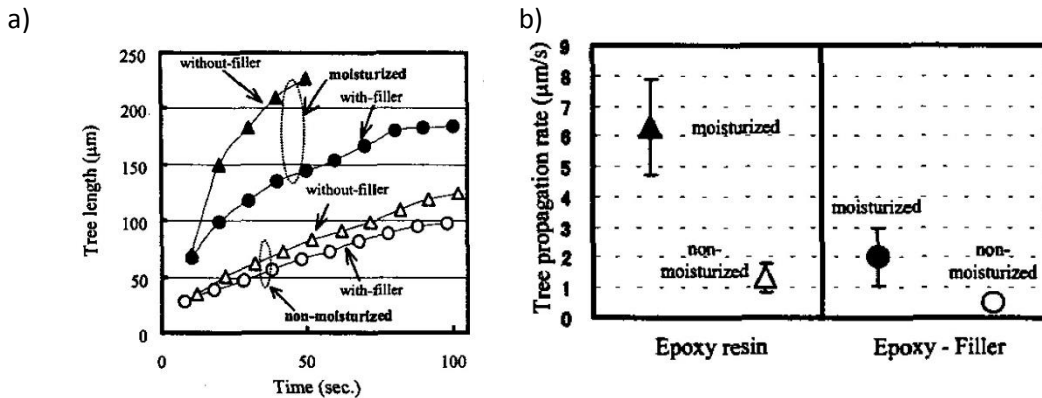


Fig. 3.54 influenza della forma della carica sul fenomeno di treeing in condizioni di umidità: a) lunghezza delle ramificazioni ; b) velocità di propagazione

3.4.4. Resistività di volume e di superficie

La resistività e il suo andamento in funzione delle grandezze di influenza è molto importante soprattutto nelle applicazioni con tensioni continue, in quanto rappresenta il parametro chiave da cui dipende la distribuzione del campo elettrico e quindi lo stress sul materiale.

La prima grandezza che influenza la resistività di volume è la temperatura d'esercizio: nel range di temperature a cui gli isolatori in resina epossidica possono essere sottoposti, la resistività di volume decresce gradualmente da un valore di $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ad un valore di $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ (Fig.3.55a). Il secondo parametro da cui dipende la resistività di volume è il contenuto di umidità dell'isolatore: il valore di resistività decresce di almeno 7 ordini di grandezza quando si passa da una condizione completamente secca a una con il massimo contenuto di H_2O possibile (Fig.3.55b). [29]

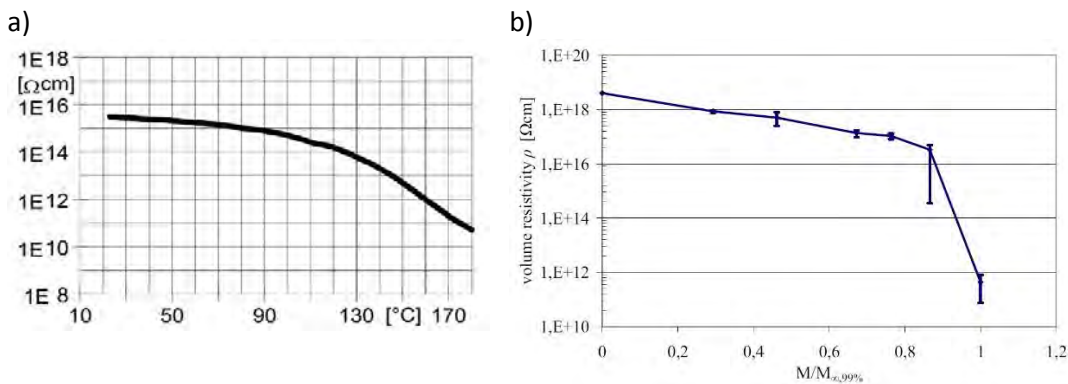


Fig. 3.55 dipendenza della resistività di volume da: a) temperatura b) contenuto di umidità

Anche la resistività superficiale dipende fortemente dalle condizioni ambientali in cui si trova a lavorare l'isolatore, sia in termini di temperatura che in termini di inquinamento e di umidità: i valori tipici variano fra $10^8 \Omega$ e $10^{16} \Omega$.

Per la misura di queste due proprietà del materiale isolante la norma di riferimento è la IEC 60093¹⁴.

3.4.5. Resistenza al tracking

Per tracciamento o tracking si intende la formazione progressiva di percorsi conduttori permanenti lungo la superficie di un isolante, determinati dall'effetto combinato della sollecitazione elettrica e della corrosione elettrolitica. Tale fenomeno è caratteristico dei materiali isolanti organici ed è causato dal passaggio di una corrente di fuga dovuta ad una riduzione della resistenza superficiale. Il passaggio della corrente di fuga porta ad aumenti locali di temperatura e alla possibilità di carbonizzazione e volatilizzazione del materiale, quindi può determinare anche un peggioramento delle proprietà meccaniche oltre che di quelle elettriche. Il processo di tracking è influenzato dalla forma e dimensione dei pezzi, nonché dallo stato delle loro superfici, dall'umidità ambientale e da fattori climatici che favoriscono la formazione di condensa, nonché dal tipo di contaminante eventualmente presente nelle condizioni di esercizio. [30]

Le modalità di prova per la resistenza al tracking vengono indicate nella norma IEC 60112¹⁵ (Fig.3.56): un provino viene disposto su supporto orizzontale e sollecitato elettricamente mediante due elettrodi in platino, mentre la superficie compresa fra tali elettrodi è interessata da un gocciolamento di soluzione elettrolitica. La prova fallisce quando a meno di 50 gocce distanziate nel tempo di 30 secondi si manifesta la corrente di fuga o un innesco di fiamma.

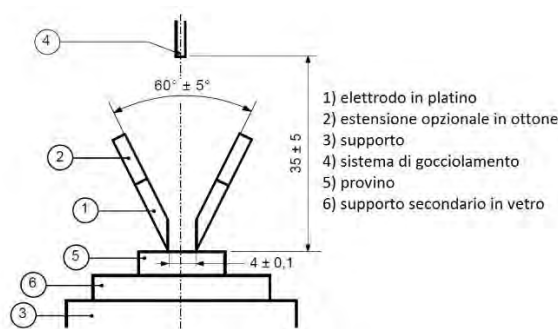


Fig. 3.56 configurazione della prova di resistenza al tracciamento

La resistenza al tracking viene valutata mediante il parametro CTI (Comparative Tracking Index) ovvero il valore della tensione massima alla quale cinque provini superano la prova. Per i sistemi epossidici utilizzati nel campo degli isolamenti elettrici il valore del CTI è sempre superiore ai 600V a.c che rappresenta il limite superiore della tensione di prova prevista dalla normativa.

Se l'isolatore è destinato a lavorare in condizioni ambientali particolarmente inquinate è opportuno qualificare la resistenza al tracking del sistema epossidico con cui è realizzato mediante la più severa norma IEC 60587¹⁶.

¹⁴ IEC 60093 Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials

¹⁵ IEC 60112 Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials

¹⁶ IEC 60587 Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion.

3.4.6. Resistenza all'arco

La resistenza all'arco elettrico è un parametro importante soprattutto per quegli isolatori che vengono utilizzati a bordo delle apparecchiature di interruzione e/o sezionamento.

Le modalità di prova vengono definite dalla norma IEC 61621¹⁷: il provino viene sollecitato da una coppia di elettrodi che determinano una tensione di 12.5kV e lo stress elettrico viene gestito a step successivi costituiti da 60 archi ciascuno. Durante il primi tre minuti di prova la corrente viene mantenuta a 10mA mentre la durata dei singoli archi viene aumentata da $\frac{1}{8}$ s, a $\frac{1}{4}$ s, a $\frac{1}{2}$ s minuto per minuto; dopodiché la sollecitazione diventa continua e la corrente viene aumentata di 10mA al minuto. Il test si conclude quando sulla superficie del provino si forma un percorso conduttivo che fa scomparire i tipici effetti luminosi dell'arco elettrico. La resistenza all'arco viene espressa come l'intervallo di tempo compreso fra l'inizio delle sollecitazioni e il cedimento del provino. I valori tipici per le resine epossidiche variano da 90 a 130 secondi.

¹⁷ IEC 61621 Dry solid insulating materials – Resistance test to high-voltage, low current arc discharges.

4. ISOLATORI PER AMBIENTI ESTERNI

Gli isolatori da esterno sono indubbiamente sottoposti a fattori di stress e inquinamento molto più marcati rispetto a quelli che lavorano in ambienti chiusi, come quadri ed altri apparecchi elettrici. Essi sono infatti sottoposti all'azione combinata dell'umidità, della radiazione solare, dell'elevata temperatura e dei depositi inquinanti.

L'inquinamento atmosferico, sia di tipo industriale che marino, influenza in modo determinante la tenuta superficiale dell'isolatore: con la permanenza in un ambiente inquinato, le superfici isolanti vanno via via ricoprendosi di depositi che ne alterano le caratteristiche superficiali e che diventano particolarmente critici in presenza di piogge, rugiada o nebbia. Infatti la presenza di acqua sulla superficie rende parzialmente conduttivi gli strati di deposito che in condizioni secche sono assolutamente isolanti, determinando un aumento della corrente di fuga nelle zone umide. Questa corrente di fuga asciuga per effetto Joule le aree che da essa sono interessate, aumentandone la resistenza superficiale. Si creano così le condizioni favorevoli all'innescò di un arco elettrico che cortocircuita la zona asciutta e la allunga per effetto del calore che sprigiona alla radice: infatti per mantenere la conduzione, la radice dell'arco è costretta a muoversi sulla superficie fino ad incontrare una zona ancora umida che verrà asciugata. L'allungamento dell'arco può arrestarsi se raggiunge una lunghezza tale per cui la tensione necessaria a mantenere una certa conduzione è superiore alla tensione di alimentazione, oppure può cortocircuitare gli elettrodi determinando il cedimento totale dell'isolamento.

Il cedimento dell'isolamento per effetto delle scariche superficiali sulle superfici contaminate si manifesta a tensioni più basse nelle apparecchiature che lavorano sotto tensione continua perché essa concede più tempo all'arco elettrico per allungarsi. La tenuta alle scariche superficiali in tensione alternata è molto più elevata perché nella maggior parte dei casi l'arco si innesca in prossimità del massimo della sinusoide, sia nel semiperiodo negativo che in quello positivo, ma si estingue in tempi brevi. La presenza di depositi di contaminante è quasi del tutto ininfluenza rispetto alla tensione di tenuta dell'isolatore alla tensione impulsiva perché la sollecitazione elettrica è troppo breve rispetto ai tempi necessari per la formazione della zona asciutta.

Bisogna ricordare che oltre al materiale e alla tensione di esercizio, anche le dimensioni e il profilo dell'isolatore influenzano il suo comportamento in presenza di inquinamento: è di primaria importanza il valore della linea di fuga, ovvero della distanza fra le due estremità conduttive lungo la superficie dell'isolatore stesso. La norma IEC 60815¹⁸ distingue quattro classi di inquinamento e per ciascuna assegna un coefficiente (dcs) per la determinazione della linea di fuga minima in funzione della tensione di esercizio e della geometria del pezzo.

Inquinamento	Linea di fuga (dcs)
Leggero	16 mm/kV
Medio	20 mm/kV
Pesante	25 mm/kV
Molto pesante	31 mm/kV

Tab. 4.1 prescrizioni della norma IEC 60815 sulla linea di fuga minima

La formula completa per il calcolo della linea di fuga minima di uno specifico isolatore è:

¹⁸ IEC 60815: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions

$$l_{f_{min}} = U_{nom} \cdot d_{sc} \cdot K_D \quad (4.1)$$

Il valore da assegnare a K_D dipende dal diametro medio dell'isolatore (D_m), come espresso in Tab.4.2.

Diametro medio	K_D
$D_m < 300\text{mm}$	1
$300\text{mm} < D_m < 500\text{mm}$	1.1
$D_m > 500\text{mm}$	1.2

Tab. 4.2 coefficiente per la determinazione della linea di fuga

Il profilo dell'isolatore deve avere una linea di fuga superiore al valore restituito dall'Eq.4.1 e per farlo possono essere adottate delle sequenze di alette che hanno anche la funzione di limitare l'accumulo del materiale contaminante.

- **Idrofobicità**

Il carattere idrofilo o idrofobo del materiale isolante utilizzato è il fattore predominante per lo sviluppo delle scariche sulle superfici contaminate. Materiali idrofili come il vetro e la porcellana consentono la formazione di un velo d'acqua continuo sulla loro superficie che è invece altamente improbabile si manifesti nei materiali idrofobi come la gomma siliconica. Perciò, a parità di deposito contaminante, la resistenza superficiale di un isolatore in gomma siliconica è di qualche ordine di grandezza superiore rispetto a quella di un isolatore in vetro o in porcellana, con conseguente diminuzione dei fenomeni di scarica superficiale che innescano l'arco elettrico e quindi una minore probabilità di cedimento dell'isolatore. Va comunque considerato che l'idrofobicità degli isolatori polimerici può diminuire nel tempo per effetto dell'invecchiamento termo-chimico: il suo comportamento può essere monitorato misurando la corrente di dispersione sulla superficie dell'isolatore, tenendo presente che maggiore è la corrente di dispersione minore è l'idrofobicità.

L'idrofobicità di un materiale si misura con l'*angolo di contatto*, definito come l'angolo compreso fra la direzione della tensione solido-liquido e la direzione della tensione liquido-gas, tangente alla superficie esterna della goccia e con il vertice nel punto triplo (liquido-solido-gas). Se la superficie in esame è piana, l'angolo di contatto è unico (Fig.4.1a); se invece è inclinata si deve differenziare il *receding angle* θ_r dall'*advancing angle* θ_a (Fig.4.1b).

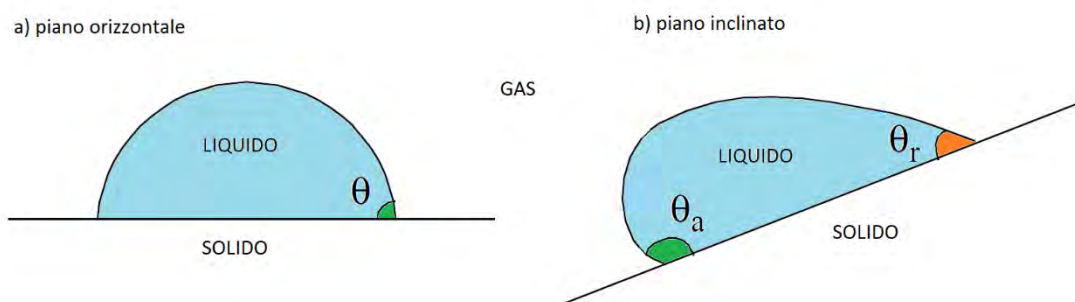


Fig. 4.1 angolo di contatto sul piano orizzontale e sul piano inclinato

La tendenza di una goccia ad appiattirsi sulla superficie aumenta al diminuire dell'angolo di contatto: alla bagnabilità nulla corrisponde $\theta=90^\circ$, alla bagnabilità totale corrisponde $\theta=0^\circ$, perciò un materiale idrofilo avrà $\theta < 90^\circ$ e uno idrofobo avrà $\theta > 90^\circ$.

L'idrofobicità di un isolante da esterno può essere valutata con uno dei metodi presentati nella norma IEC 62073¹⁹, il più diffuso dei quali è il metodo spray: esso prevede che su un campione di 50-100 cm² venga spruzzata una sottile nebbia ad una distanza di circa 25cm per più di 30 secondi, al termine di questa fase si analizza la forma assunta dalle gocce depositatesi sul provino e si attribuisce il materiale per confronto ad una delle sette classi indicate con la sigla WC, dove a WC1 corrisponde la massima idrofobicità mentre a WC7 corrisponde la massima idrofilia. Questo metodo di valutazione è sicuramente molto veloce ed economico, ma si affida all'esperienza dell'operatore per la formulazione dei risultati. In alternativa è possibile intraprendere delle misurazioni più complesse sull'angolo di contatto stesso o sulla tensione superficiale.

Per gli isolatori da esterno, la resina epossidica "standard" ha delle caratteristiche assolutamente insufficienti ($\theta < 90^\circ$); in passato la quasi totalità di questi componenti veniva realizzata in vetro o in porcellana, nonostante il loro comportamento idrofilo, ma ora si affacciano anche altre possibilità.

Si può ricorrere all'utilizzo di:

1. Isolatori compositi con il nucleo in resina epossidica (oppure ancora in porcellana o vetro) rivestiti da un guscio in *gomma siliconica*,
2. Resine epossidiche di tipo *cicloalifatico*,
3. Resine epossidiche di tipo *idrofobico*.

4.1. GOMMA SILICONICA

Gli isolatori realizzati con sistemi epossidici tradizionali subiscono pesantemente le conseguenze del fenomeno del tracking quando vengono utilizzati in aree con alto fattore di umidità, intensa radiazione ultravioletta, presenza di piogge acide e di inquinamento generale. Il silicone d'altra parte presenta un'estrema resistenza alle alte (>200°C) e alle basse temperature (<-150°C), a cui mantiene inalterate le proprie caratteristiche fisico meccaniche; offre un'elevata resistenza all'azione degli agenti atmosferici, quali UV, ozono e a numerose sostanze chimiche; ha una spiccata antiaderenza che non consente la formazione di incrostazioni; è idrofobico, può essere facilmente pigmentato ed è un ottimo isolante elettrico; tuttavia non possiede le caratteristiche meccaniche idonee a svolgere funzioni di sostegno e supporto. La soluzione ideale è perciò quella di un isolatore composito, con il nucleo interno in resina epossidica, che garantisce l'appropriata resistenza alle sollecitazioni elettriche e meccaniche, rivestito da un guscio di gomma siliconica, opportunamente disegnato per soddisfare le prescrizioni sulla linea di fuga e per proteggere il *core* dagli agenti atmosferici. L'utilizzo del rivestimento in gomma siliconica garantisce un aumento della tensione di scarica in condizioni inquinate, riduce l'intensità dei fenomeni corona e delle correnti di dispersione che per effetto Joule possono riscaldare la superficie dell'isolatore. [31] [32]

¹⁹ IEC 62073: Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces



Fig. 4.2 esempio di isolatore composito con nucleo in resina epossidica e guscio in gomma siliconica

4.1.1. Polimerizzazione e Idrofobicità

I siliconi sono polimeri inorganici basati su una catena Silicio-Ossigeno e gruppi funzionali organici (R) legati agli atomi di silicio.

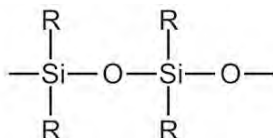


Fig. 4.3 monomero di silicone

Nella sua forma elastomerica (VMQ), il silicone si presenta sia in forma liquida (LSR *Liquid Silicone Rubber*) che in pasta (HCR *High Consistency Rubber*) e può vulcanizzare sia con l'apporto di temperatura (siliconi HTV *High Temperature Vulcanizing*), sia a temperatura ambiente (siliconi RTV *Room Temperature Vulcanizing*).

Fondamentale per raggiungere la vulcanizzazione è la presenza all'interno della miscela di un catalizzatore. I principali tipi di catalizzatore sono rappresentati dal diclorobenzoilperossido (siliconi perossidici) e da derivati del platino (siliconi platinici). Sovente²⁰, a completamento del processo di vulcanizzazione, viene effettuato un ulteriore trattamento, denominato post-curing, che consiste nel riscaldamento del prodotto finito all'interno di forni a circolazione forzata d'aria calda. Tale processo migliora le caratteristiche meccaniche dei particolari ed elimina i residui di sostanze volatili non decomposte ancora presenti.

La gomma siliconica manifesta una spiccata capacità di ripristinare il suo comportamento idrofobico in breve tempo, qualora esso sia venuto meno a causa soprattutto del manifestarsi prolungato di fenomeni di scarica e dell'adozione di profili con un'ampia superficie di contatto, quindi maggiormente esposti all'inquinamento e all'umidità. L'idrofobicità è legata alla presenza nel materiale di composti a basso peso molecolare (LMW *Low Molecular Weights*): una loro diminuzione sulla superficie dell'isolatore può essere determinata dall'azione combinata dell'umidità e della sollecitazione elettrica oppure dai fenomeni di tracking e di scarica superficiale. Ad ogni modo nella gomma siliconica è facile aumentare la concentrazione degli LMW attraverso l'utilizzo di filler come l' $\text{Al}(\text{OH})_3$ ed inoltre si manifesta spontaneamente una migrazione di tali elementi leggeri dal nocciolo verso la superficie dell'isolatore quando essa ne è carente. La velocità con cui l'idrofobicità dell'isolatore viene ripristinata è perciò direttamente proporzionale alla quantità di LMW presenti nel materiale. [33] Inoltre, se gli LMW sono presenti con concentrazioni molto elevate, possono addirittura diffondersi negli strati di contaminante forzandolo a trasformarsi da idrofilo ad idrofobico,

²⁰ ma non nel caso degli isolatori per Media Tensione attualmente in produzione presso la Veneta Isolatori S.p.A.

soprattutto in situazioni in cui la radiazione ultravioletta e l'aumento di temperatura favoriscono tale processo. Questo comportamento tipico della gomma siliconica si riflette in una drastica diminuzione delle attività di manutenzione degli isolatori in esercizio perché non sarà più necessario sottoporli a cicli di lavaggio frequenti come quelli richiesti degli isolatori in materiale ceramico; inoltre è possibile procedere con altri trattamenti superficiali mirati all'aumento della concentrazione degli LMW e quindi al mantenimento prolungato dell'idrofobicità.

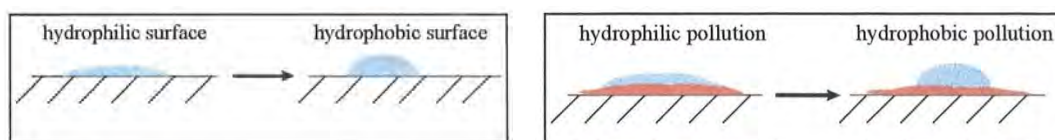


Fig. 4.4 ripristino e trasferimento del comportamento idrofobico ad opera degli LMW

4.1.2. Tecnologia di Processo

La gomma siliconica liquida (LSR) ha il vantaggio di essere flessibile, di avere una bassa densità e una viscosità relativamente contenuta (da 60Pas a 2000Pas) che la rende idonea alla produzione di manufatti per stampaggio. [34]

La LSR viene fornita come un sistema bicomponente pronto all'uso: il componente A e il componente B vengono convogliati ad un miscelatore statico in rapporto 1:1 ($\pm 5\%$) e ad essi viene aggiunta la pasta colorante (0.5÷2% del peso totale). Dal mixer la miscela viene iniettata in uno stampo preriscaldato a temperature comprese fra i 110°C e i 150°C a pressioni comprese fra 70 e 90 bar e si polimerizza in pochi minuti. Quando la gomma viene utilizzata come guscio di un nucleo in resina epossidica le temperature di stampaggio vengono mantenute più basse per evitare di stressare troppo il materiale, inevitabilmente sottoposto a valori superiori rispetto alla temperatura di transizione vetrosa. Le pressioni devono essere aumentate quando si deve garantire il riempimento ottimale di stampi con geometrie complesse, tenendo presente tuttavia che valori esagerati potrebbero determinare la deformazione di eventuali parti interne da inglobare.

Per fare in modo che il rapporto di miscelazione venga mantenuto, nonostante i due componenti possano avere viscosità differenti, si utilizzano delle pompe idrauliche a pistone e dei sistemi di interbloccaggio; a ciò si aggiungono dei controlli di volume e di pressione che monitorano il flusso del materiale dal dosatore al miscelatore.

Qualora sia necessario potenziare alcune caratteristiche fisico-chimiche del prodotto finale, come resistenza al fuoco, al tracking, all'erosione o un generale miglioramento del comportamento meccanico, si utilizzano dei filler simili a quelli impiegati come cariche nei sistemi epossidici: i più diffusi sono l'allumina (ATH), il quarzo e la wollastonite. La carica rappresenta il 45÷55% del peso totale della miscela siliconica, tale valore viene limitato soprattutto dall'eccessivo aumento di viscosità che peggiora la lavorabilità del materiale. [35]

Quando la miscela siliconica viene a contatto con lo stampo riscaldato tende a gonfiarsi e a risalire nell'ugello di iniezione: per evitare ciò il sistema di iniezione viene mantenuto in posizione avanzata fintantoché la gomma non ha iniziato a vulcanizzare. Tuttavia dato che la produzione di isolatori non richiede particolare attenzione per la finitura estetica, questo accorgimento può essere evitato. Inoltre per essere certi che la miscela siliconica non polimerizzi nell'ugello e nel cilindro di iniezione esso viene raffreddato da un flusso d'acqua a circa 20°C.

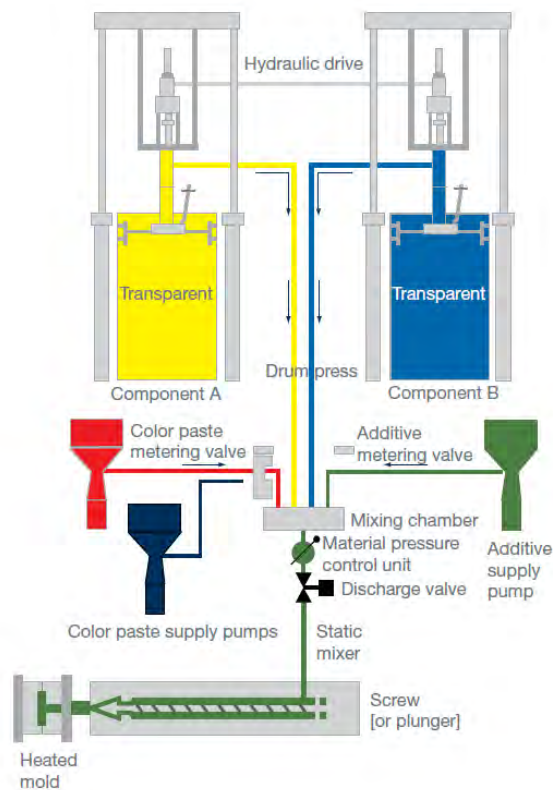


Fig. 4.5 impianto di miscelazione e stampaggio della gomma siliconica

Nel processo produttivo deve assolutamente essere evitata la presenza di aria e umidità: la prima perché potrebbe rimanere intrappolata nel prodotto finale sotto forma di bolle e cavità, la seconda perché agisce da inibitore della reazione di polimerizzazione.

Il prodotto finito può subire un ritiro lineare di qualche per cento per effetto della volatilizzazione di alcuni elementi chimici: l'entità del ritiro dipende molto dalla temperatura di stampaggio e dalla geometria del pezzo (il ritiro sarà tanto più marcato quanto più sottile è la parte interessata).

- **Interfaccia resina-gomma**

Affinché l'isolatore composito svolga la sua funzione in maniera ottimale e duratura nel tempo, la qualità dell'interfaccia fra il nucleo in resina epossidica e il guscio in gomma siliconica deve essere particolarmente curata. La presenza di delaminazioni, distacchi, difetti superficiali può arrecare danno all'intero isolamento in misura proporzionale alla sollecitazione elettrica a cui è sottoposto. I difetti possono distorcere la distribuzione del campo elettrico ed essere origine di scariche parziali; inoltre, se sono tali da consentire la penetrazione dell'umidità e della pioggia, determinano un aumento delle perdite dielettriche tanto più marcato quanto più il materiale ha subito l'invecchiamento (Fig.4.6). [36]

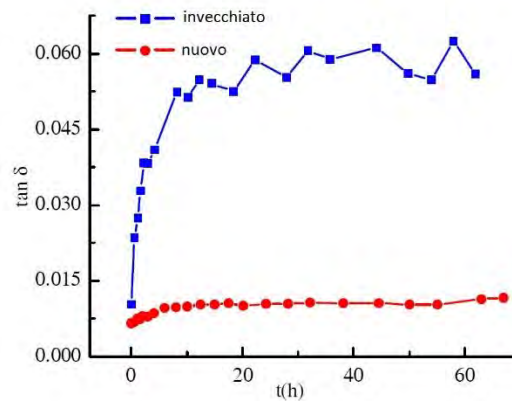


Fig. 4.6 aumento delle perdite dielettriche di un isolatore composito con difetti interfacciali sottoposto ad un ambiente con il 90% di umidità relativa

La situazione può peggiorare se si manifestano dei fenomeni corona in quanto l'interazione chimica fra l'acqua e gli acidi nitrici prodotti dall'attività di scarica degrada le superfici per idrolisi, determinando addirittura una diminuzione del valore di T_G della superficie della resina.

Per garantire un'adesione completa e durevole fra resina e gomma si deve migliorare la rugosità della superficie del nucleo con un trattamento di sabbatura e successivamente vi si applica un primer a base siliconica prima che venga collocato nello stampo del guscio. [37]

4.1.3. Proprietà Elettriche

Come si è visto per la resina epossidica, i parametri che qualificano un materiale isolante sono la costante dielettrica relativa, il fattore di dissipazione, la rigidità dielettrica e la resistività. [38]

I valori di ϵ_r di una gomma siliconica per applicazioni elettriche²¹ variano fra 2.5 e 2.7, decisamente minori rispetto a quelli della resina epossidica (3.5÷4.5). Confrontate con il comportamento dei sistemi epossidici, le miscele siliconiche mostrano una maggiore stabilità del valore della costante dielettrica relativa alle variazioni di temperatura. Considerando invece l'andamento della ϵ_r , scomposta nelle sue parti reale ϵ' ed immaginaria ϵ'' , in funzione della frequenza, si osserva che ϵ' decresce leggermente mentre ϵ'' assume una forma ad U. [39]

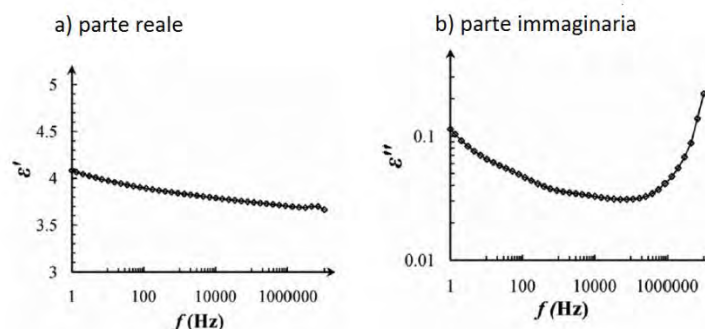


Fig. 4.7 andamento della costante dielettrica complessa in funzione della frequenza

La costante dielettrica relativa della LSR può essere aumentata con l'utilizzo di filler come ZnO , TiO_2 , Al_2O_3 , $BaTiO_3$. È in fase di studio la possibilità di utilizzare negli isolatori compositi

²¹ MOMENTIVE Silopren Electro 242-1

un guscio siliconico con valori di ϵ_r molto più elevati di quelli standard, allo scopo di uniformare la distribuzione di campo elettrico sull'interfaccia, riducendone la componente tangenziale. [40] In alternativa sono attive delle ricerche sull'utilizzo di cariche (SiC) che rendano la gomma siliconica un dielettrico non lineare, ovvero con un valore di conducibilità che è funzione del campo elettrico applicato, sempre allo scopo di uniformare la sollecitazione del campo elettrico sull'isolatore composito. [41]

Il fattore di dissipazione $\tan\delta$ manifesta un andamento in funzione della frequenza analogo a quello della parte immaginaria della costante dielettrica complessa: quando la frequenza della tensione di alimentazione supera i 20kHz si osserva un notevole incremento delle perdite dielettriche che può portare allo sviluppo del treeing a tensioni più basse rispetto a quelle riscontrate a frequenze minori.

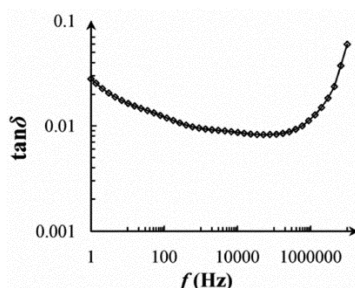


Fig. 4.8 andamento del fattore di perdita in funzione della frequenza

La resistività di volume dell'LSR per applicazioni elettriche è dell'ordine di $5 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, non molto diversa da quella della resina epossidica.

La resistenza all'arco, misurata secondo la norma IEC 61621 (vedasi 2.4.6), della gomma siliconica è superiore ai 300 secondi, più del doppio di quello garantito dalla resina epossidica.

- **Resistenza al tracking secondo IEC 60587**

Essendo la LSR destinata all'utilizzo all'esterno in ambienti fortemente inquinati, la resistenza al tracking viene valutata secondo i criteri della norma IEC 60587 (vedasi 2.4.5). I campioni devono avere dimensioni minime di 50x120x6 mm e devono essere forati in maniera idonea all'ancoraggio degli elettrodi; prima della prova devono essere puliti con solventi idonei e se non c'è bagnabilità possono essere leggermente abrasati.

Gli elettrodi sono realizzati in acciaio inossidabile e fissati sul campione come da Fig.4.9.

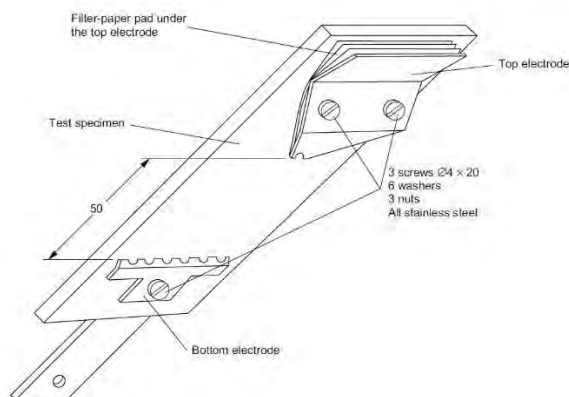


Fig. 4.9 montaggio degli elettrodi sul campione secondo IEC 60587

Fra l'elettrodo superiore e il campione vengono interposti degli strati di carta filtrante che si comportano come un "serbatoio" per la miscela contaminante: infatti per far in modo che il

flusso di contaminante fra i due elettrodi sia il più uniforme possibile, la miscela viene caricata sulla carta filtrante prima dell'applicazione della tensione. Il campione deve poi essere montato su un apposito supporto che ne garantisca la posizione inclinata a 45°.

Il circuito elettrico per la prova è rappresentato in Fig.4.10.

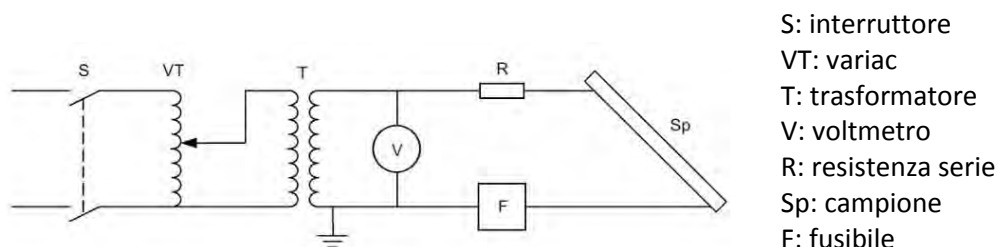


Fig. 4.10 circuito di prova secondo IEC 60587

La sorgente di alimentazione deve lavorare a frequenze comprese fra i 45 Hz e i 65 Hz con una tensione di uscita variabile fino ad almeno 6kV con una precisione del $\pm 5\%$.

Il valore della resistenza serie, così come quello della portata del contaminante, deve essere scelto in funzione della tensione di prova, secondo la Tab.4.3.

Tensione di prova	Portata contaminante	Resistenza serie
1 → 1.75	0.075 ml/min	1 kΩ
2 → 2.75	0.15 ml/min	10 kΩ
3 → 3.75	0.30 ml/min	22 kΩ
4 → 4.75	0.60 ml/min	33 kΩ
5 → 6	0.90 ml/min	33 kΩ

Tab. 4.3 valori di portata del contaminante e della resistenza serie per la prova secondo IEC 60587

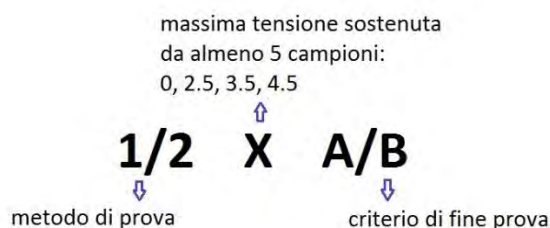
Le possibili modalità di prova sono due:

- Il *metodo 1* prevede l'applicazione di una tensione costante per almeno 6 ore continuative.
- Il *metodo 2* prevede l'applicazione di una tensione a gradini da 250V per 1 ora.

Anche i criteri di fine prova sono due:

- Il *criterio A* sancisce la fine della prova quando la corrente nel circuito supera i 60mA, ovvero la soglia di intervento del fusibile, oppure al manifestarsi di evidenti fenomeni erosivi.
- Il *criterio B* sancisce la fine della prova quando il percorso di tracking supera i 25mm dall'elettrodo inferiore, oppure al manifestarsi di evidenti fenomeni erosivi.

I risultati della prova vengono espressi con una sigla, accompagnata da una misura della profondità dell'erosione:



Le gomme siliconiche liquide per applicazioni elettriche sono qualificate da 1 A 4.5, quindi sono estremamente performanti in merito alla resistenza al tracking in condizioni fortemente contaminate.

La norma IEC 60587 fornisce un ottimo metodo di prova per ottenere dei risultati comparativi fra materiali diversi ma non consente di mettere in luce l'influenza della geometria dell'oggetto in merito alla resistenza al tracking in ambienti inquinati. Per approfondire questo aspetto si può ricorrere alle prove in nebbia salina alimentando il campione con una tensione a 50 Hz di modulo pari alla linea di fuga (mm) divisa per 34.6kV. A seconda della selettività che si desidera ottenere dai risultati della prova l'applicazione della tensione può durare 1000 ore o 5000 ore. [42] In alternativa si può testare l'isolatore anche ad una combinazione di sollecitazioni multiple come prescritto dalla norma IEC 61109²²: alimentando l'oggetto in prova alla tensione nominale, lo si sottopone a dei cicli da 24h in cui ogni 2h si cambia sollecitazione come indicato in Tab.4.4. L'isolatore supera la prova se non cede entro 5000 ore. [43]

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Umidificazione			■					■				
Riscaldamento (50°C)		■	■				■	■				■
Pioggia	■											
Nebbia salina (7 kg/m ³)				■	■				■	■		
Irraggiamento solare	■	■				■	■				■	■
Tensione verso terra	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tab. 4.4 cicli di sollecitazione per la prova di invecchiamento accelerato secondo IEC 61109

4.2. RESINA CICLOALIFATICA

Le resine epossidiche di tipo cicloalifatico sono caratterizzate da una struttura molecolare completamente saturata che le rende particolarmente resistenti all'azione dei raggi UV e al fenomeno del tracking, quindi idonee all'utilizzo come materiale isolante da esterno.

Rispetto alla porcellana, gli isolatori in resina cicloalifatica sono più leggeri, meccanicamente più resistenti, necessitano di minor manutenzione, possono essere prodotti con processi più economici, hanno migliori proprietà elettriche e si prestano al realizzo di forme complesse anche con inserti metallici. Il vantaggio principale della resina cicloalifatica rispetto alla gomma siliconica è quello di avere un comportamento meccanico idoneo a svolgere funzioni di supporto e di sostegno. In generale si può affermare che è conveniente scegliere un isolatore in cicloalifatica rispetto a un composito in epossidica e LSR fino a che la tensione nominale non supera i 25kV: l'utilizzo di un unico componente riduce i costi produttivi e minimizza i problemi legati all'interfaccia fra dielettrici diversi. Per tensioni e quindi dimensioni più elevate l'utilizzo degli isolatori compositi è certamente più versatile. [44]

Le resine cicloalifatiche sono caratterizzate da una viscosità più bassa rispetto alle epossidiche tradizionali (700÷900²³ mPa·s contro circa 500²⁴ mPa·s): ciò rende possibile caricarle con i filler in percentuali maggiori senza peggiorarne la lavorabilità, conseguendo migliori performances meccaniche e di resistenza alla traccia, oltre ad una riduzione dei costi.

²² IEC 61109 Insulators for overhead lines - Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria

²³ ARALDIT 5997 – Huntsmann

²⁴ ARALDIT CY 184 – Huntsmann

Le cariche più diffuse sono quelle di quarzo e di allumina in quanto riducono il coefficiente di espansione termica e l'esotermia della reazione di polimerizzazione. [45]

I valori della costante dielettrica relativa, del fattore di dissipazione e della resistività di una resina cicloalifatica sono simili a quelli di un sistema epossidico tradizionale. Il mantenimento di questi valori nel tempo dipende molto dal contenuto di umidità dell'ambiente in cui lavora l'isolatore (vedasi 3.4.1) che per le applicazioni da esterno è certamente un fattore molto incisivo. [46]

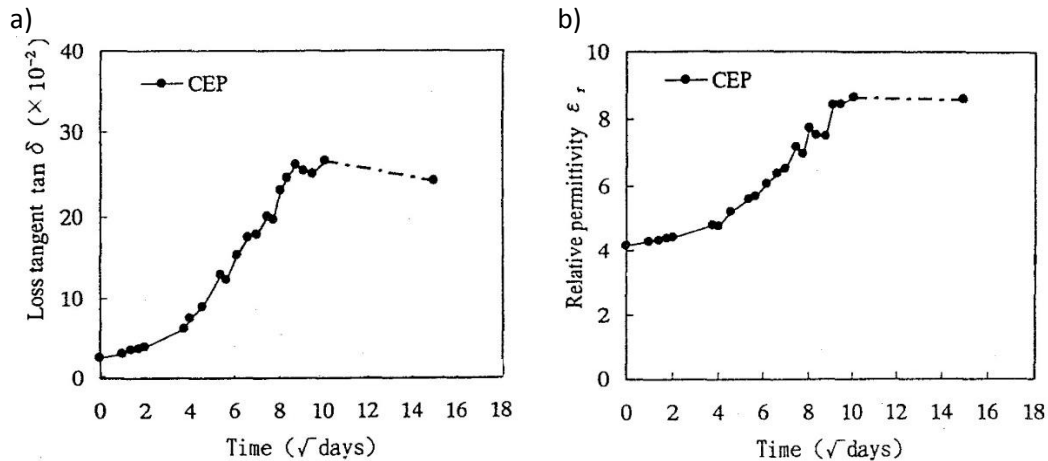


Fig. 4.11 andamento nel tempo del fattore di perdita (a) e della permittività relativa (b) di un campione mantenuto in atmosfera con un alto valore di umidità relativa

Facendo riferimento alla norma IEC 60587 la resistenza alla traccia di una resina cicloalifatica è inferiore rispetto a quella di una gomma siliconica (1A 4.5 per la gomma, 1B 3.5 per la resina cicloalifatica); invece il comportamento all'arco elettrico secondo norma IEC 61621 è decisamente meno performante ($t > 300$ s per la gomma, $t < 200$ s per la resina cicloalifatica).

Per monitorare le prestazioni degli isolatori in ambiente inquinato si può studiare il comportamento della corrente di fuga superficiale al variare delle condizioni operative. In modo particolare per le resine da esterno, la *leakage current* varia la sua ampiezza e forma d'onda in maniera strettamente legata all'umidità relativa e alla tensione applicata: è possibile quindi affermare che la tensione di scarica dell'isolatore si riduce per effetto dell'inquinamento in misura proporzionale all'aumento della corrente di fuga. [47] Per migliorare la performance dell'isolatore in atmosfera inquinata è necessario curare in maniera particolare la formulazione della miscela cicloalifatica e la gestione del processo produttivo, oltre all'adozione di una linea di fuga adeguata alle specifiche condizioni del sito di installazione.

4.3. RESINA IDROFOBICA

La resina idrofobica conserva gli stessi vantaggi della cicloalifatica quando viene confrontata con la porcellana e la gomma siliconica. Tuttavia rispetto alla cicloalifatica tradizionale, questa sua evoluzione presenta tre vantaggi principali: [48]

1. La resina idrofobica è capace dello stesso trasferimento di idrofobicità agli strati di contaminanti depositati mostrato della gomma siliconica
2. La resina idrofobica è in grado di recuperare il suo grado originario di idrofobicità se cessano le cause che lo hanno indebolito (es. attività di scarica)

3. La resina idrofobica è molto più resistente della cicloalifatica agli stress termici ripetuti, nonostante la differenza fra il suo coefficiente di dilatazione e quello degli inserti metallici annegati sia la medesima dei sistemi cicloalifatici.

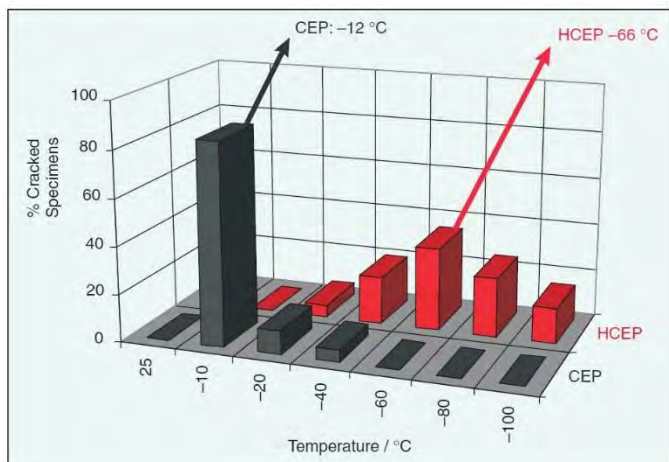


Fig. 4.12 confronto fra la resistenza agli stress termici della resina cicloalifatica CEP e dell'idrofobica HCEP

Dal punto di vista chimico, la resina idrofobica può essere considerata un'evoluzione della cicloalifatica: la ridotta bagnabilità superficiale si ottiene aggiungendo degli additivi particolari che modificano anche la reologia della miscela, rendendola più simile ad un gel. Nella condizione di completa polimerizzazione questi additivi sono in grado di migrare dalla superficie dell'isolatore agli strati di contaminante trasformandoli da idrofili ad idrofobici, similmente a ciò che avviene con gli LMW nella gomma siliconica. L'effetto non ha la stessa portata di quello ottenibile dalla LSR perché la resina deve avere una struttura molecolare piuttosto fitta per resistere agli stress meccanici e quindi la permeabilità agli elementi con basso peso molecolare è più limitata. [49]

Dal punto di vista della tecnologia di processo, per liquefare la consistenza gelatinosa della resina idrofobica è necessario riscaldarla a circa 50°C. Il rapporto di miscelazione ideale con l'indurente è di 100:82 ed è possibile caricare il sistema con la stessa tipologia e percentuale di filler usati per quello cicloalifatico. La viscosità del sistema miscelato è la stessa di quello epossidico classico, quindi non ci sono particolari necessità di intervento sul processo e sull'attrezzatura di stampaggio.

Dal punto di vista della resistenza meccanica, la resina idrofobica mostra migliore resistenza al creep di quella cicloalifatica nel range di temperatura compreso fra 23°C e 90°C. (Fig.4.13a)

L'incidenza dell'invecchiamento termo-chimico viene valutata monitorando la perdita di peso del campione sottoposto a 200°C per 60 giorni, come da norma IEC 60216: dai risultati emerge che non c'è molta differenza su questo punto fra il sistema cicloalifatico e quello idrofobico. (Fig.4.13b)

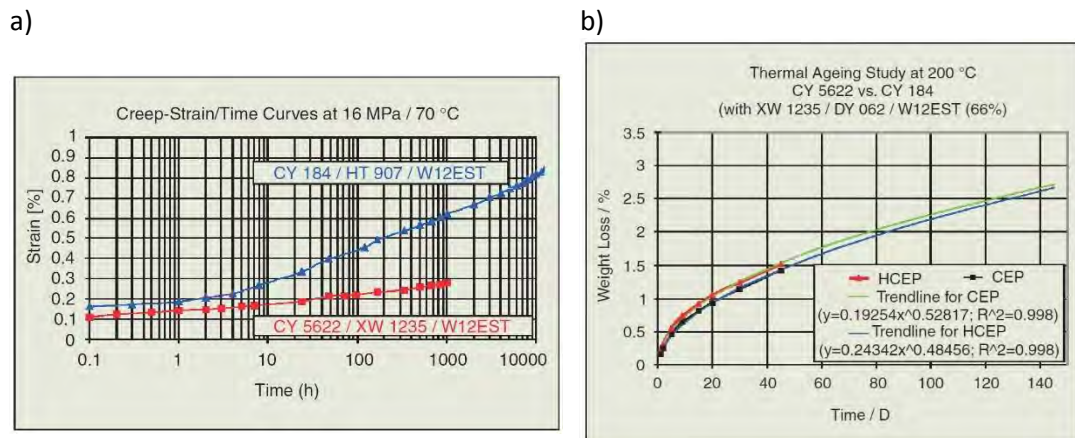


Fig. 4.13 confronto della resistenza al creep (a) e dell'invecchiamento (b) fra resina CEP e HCEP

La resina idrofobica mantiene un angolo di contatto molto elevato anche sotto l'esposizione prolungata all'effetto dei raggi UV: come si vede dalla Fig.4.14 le performance della miscela idrofobica superano addirittura quelle della gomma siliconica per tempi di esposizione maggiori a 7000 ore.

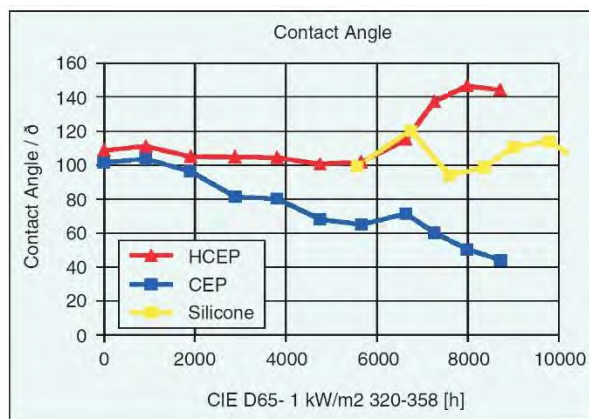


Fig. 4.14 andamento nel tempo dell'angolo di contatto misurato su un campione esposto a radiazioni UV

La resistenza al tracking di una resina idrofobica dipende molto dalla carica utilizzata: la classe 1B3.5, come quella della cicloalifatica, viene raggiunta quando si utilizza solo del quarzo; mentre aggiungendo ATH²⁵ in quantità pari a 1/6 del peso totale del filler si può arrivare alla classe 1B4.5, penalizzando però alcune proprietà meccaniche. [50]

Sperimentalmente è stato dimostrato che l'aumento di peso dovuto all'assorbimento dell'umidità è lo stesso sia per la resina idrofobica che per quella cicloalifatica e che ciò determina lo stesso peggioramento delle proprietà elettriche in termini di $\tan\delta$ ed ϵ_r . Per questo anche nei sistemi idrofobici è necessario utilizzare un filler di quarzo che sia stato sottoposto ad un trattamento di silanizzazione. (Fig.4.15)

²⁵ Allumina TriHydrate

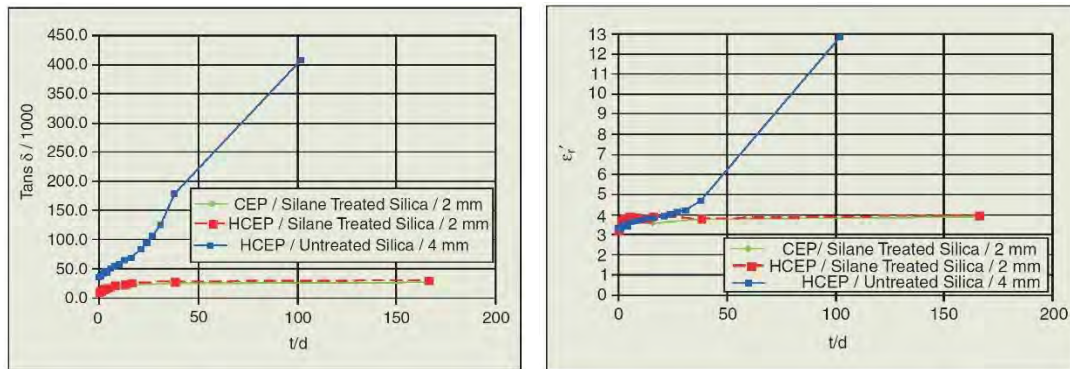


Fig. 4.15 incremento del fattore di perdita (a) e della permittività dielettrica (b) per effetto dell'assorbimento d'acqua

5. ANALISI DI CAMPO ELETTRICO

Uno degli aspetti pratici più importanti nell'ingegneria delle alte tensioni è la prevenzione di ogni tipo di cedimento elettrico a cui può essere soggetto il sistema di isolamento (scariche parziali, tracking, fenomeni corona, perforazioni), in modo da garantirne una lunga vita d'esercizio. Per conseguire una buona progettazione degli isolatori di Media Tensione è molto importante conoscere la distribuzione dello stress elettrico nel materiale isolante interposto fra gli elettrodi: in questo modo sarà possibile prevederne il comportamento quando è sottoposto alle tensione di esercizio, alla tensione di prova a frequenza industriale, alla prova delle scariche parziali e in misura più incerta anche alla tensione della prova ad impulso. [51]

Il campo elettrico prodotto dalla presenza di tensione sulle parti conduttrici stressa il dielettrico in misura proporzionale all'intensità della sollecitazione, valutata in termini di kV/mm. Per garantire la tenuta dell'isolatore, questa sollecitazione deve essere inferiore alla rigidità dielettrica del materiale isolante, di cui tuttavia non è possibile dare una precisa valutazione quantitativa perché è influenzata da:

- composizione del dielettrico,
- presenza di impurità e imperfezioni,
- uniformità del campo elettrico applicato,
- condizioni di pressione, umidità e temperatura,
- durata, intensità e forma d'onda della tensione applicata.

Quando il campo elettrico ha configurazione uniforme, la tensione di innesco dei fenomeni di scarica parziale, sia interni che superficiali, è pari alla tensione di scarica del dielettrico (ossia quando l'isolatore scarica lo fa senza che si siano manifestati prima dei segnali di cedimento). Questo si verifica anche nel caso di campi leggermente disuniformi, come quello di tipo radiale presente fra due cilindri coassiali, mentre se il campo è fortemente disuniforme la tensione di innesco dei fenomeni di scarica parziale è molto più bassa rispetto a quella che determina il cedimento completo. Di conseguenza il materiale isolante avrà una tenuta dielettrica tanto più elevata quanto più uniforme è il campo elettrico che lo interessa. Il grado di uniformità del campo elettrico può essere espresso dal parametro:

$$\eta = \frac{\hat{E}_{\text{medio}}}{\hat{E}_{\text{massimo}}} \quad (5.1)$$

Questo parametro è sempre compreso fra 0 e 1; tanto più è prossimo all'unità, tanto più efficace è lo sfruttamento del dielettrico perché la configurazione di campo è più uniforme.

Anche il tipo di tensione applicata influenza la capacità di tenuta del dielettrico, sia in termini di durata e ripetizione del picco, sia in termini di simmetria del potenziale applicato. La dissimmetria sul potenziale determina un peggioramento del grado di uniformità del campo e quindi stressa maggiormente il dielettrico; può essere determinata sia dal fatto che i due elettrodi hanno forma diversa sia dall'applicazione del potenziale di terra ad uno dei due. In quest'ultimo caso le linee di campo si addenseranno in particolar modo sui contorni dell'elettrodo a cui è applicato il potenziale non nullo.

È chiaro quindi che i valori di rigidità dielettrica presenti nelle schede tecniche delle resine epossidiche non possono essere assunti come veri e propri limiti di tenuta, in quanto sono stati ricavati su campioni molto curati e con configurazioni di prova che rendono il campo elettrico il più uniforme possibile. La massima sollecitazione elettrica sopportabile dagli

isolatori realizzati con un processo produttivo industrializzato e sottoposti a campi elettrici molto disuniformi è sensibilmente inferiore rispetto ai 18-20kV/mm riscontrati in condizioni quasi ideali. Sulla base dell'esperienza di *Veneta Isolatori S.p.A.*, lo stress elettrico massimo sopportato da un isolatore in resina epossidica alla prova in frequenza e alle scariche parziali è di 7-8kV/mm mentre si può arrivare a 10kV/mm nel caso della prova ad impulso.

Soprattutto negli isolatori passanti, il campo elettrico è limitato e mantenuto il più possibile radiale dalla presenza di uno schermo, in posizione coassiale rispetto al conduttore centrale (Fig.5.1). Questo schermo è realizzato con una rete elettrosaldata, preferibilmente in ottone perché ha un coefficiente di dilatazione termica lineare più simile a quello della resina epossidica, con dei "piolini" accessibili dal profilo esterno dell'isolatore che ne permettono il collegamento a massa. Per limitare gli effetti di bordo e quindi l'intensificazione della sollecitazione elettrica gli "spigoli" dello schermo devono essere particolarmente curati, cercando di aumentarne il raggio di curvatura con delle lavorazioni successive (Fig.5.2).

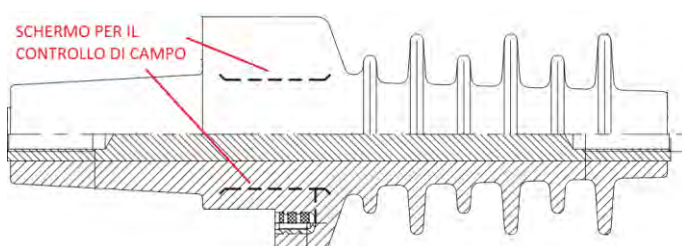


Fig. 5.1 posizionamento dello schermo di campo all'interno di un isolatore

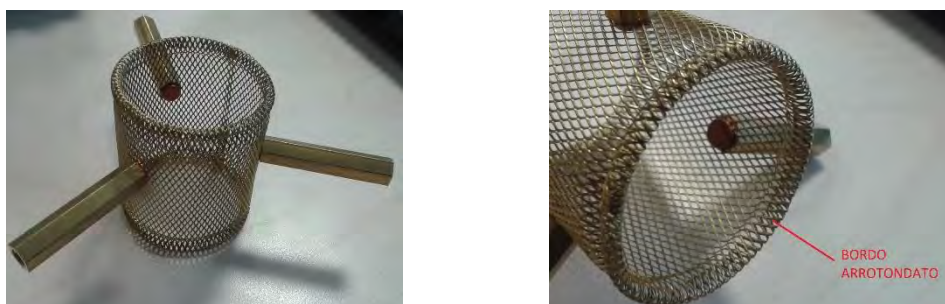


Fig. 5.2 schermo in rete di ottone elettrosaldato

Questo schermo può essere sfruttato anche come presa capacitiva per il rilevamento della presenza di tensione sul conduttore principale. Per evitare che la presenza di questa armatura possa determinare una percentuale inaccettabile di scarti al collaudo elettrico deve esserne particolarmente curato il posizionamento e il dimensionamento. Questo non è molto agevole in quanto per avere un buon accoppiamento capacitivo è necessario che la sonda sia posta in una zona a campo elettrico elevato, mentre, per non dare origine a fenomeni di stress dielettrico, la stessa sonda dovrebbe essere posta in una zona a bassa densità di campo elettrico. Per trovare un compromesso accettabile è necessario individuare una geometria interna dell'isolatore che distribuisca le linee equipotenziali il più uniformemente possibile in modo che, pur elevando il campo elettrico medio nella zona critica con la presenza dello schermo, non si abbiano punti in cui lo stress elettrico supera i limiti di tenuta del materiale isolante.

Con l'utilizzo di programmi di simulazione della sollecitazione elettrica basati sul metodo agli elementi finiti (FEM²⁶) l'iter di ottimizzazione della dimensione e della posizione dello

²⁶ Finite Element Method

schermo viene notevolmente semplificato: infatti è possibile modificare le quote del modello CAD e andare a simularne l'effetto sulla distribuzione di campo elettrico per riscontrarne immediatamente l'impatto sull'accoppiamento capacitivo e sul gradiente del campo elettrico. In questo modo si procede alla campionatura del prodotto avendo già scartato le ipotesi di lavoro con cui non si raggiungono gli obiettivi desiderati e di conseguenza si risparmia in termini di tempo e di costo.

5.1. CENNI AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI (FEM)

Il comportamento del campo elettromagnetico è completamente descritto dalle leggi di Maxwell:

$$\text{Legge di Gauss elettrica} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (5.2)$$

$$\text{Legge di Gauss magnetica} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{Legge di Faraday} \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (5.4)$$

$$\text{Legge di Ampere-Maxwell} \quad \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{H} + \mathbf{J} = 0 \quad (5.5)$$

Il campo elettromagnetico si definisce elettrostatico quando è prodotto da una carica statica o quando il potenziale applicato è costante. I campi prodotti da una tensione alternata alla frequenza industriale non sono propriamente elettrostatici, ma si comportano come quasi stazionari ovvero non sono interessati da significativi movimenti di carica nel tempo. Alla luce di ciò le equazioni di Maxwell per lo studio della sollecitazione elettrica si riducono a due, in quanto a frequenze così basse il problema elettrico e il problema magnetico possono essere studiati separatamente. L'Eq.5.2 e l'Eq.5.4 possono essere riscritte rispettivamente nella forma:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad (5.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (5.7)$$

L'Eq.5.7 può essere espressa anche come:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (5.8)$$

dove V è il potenziale elettrico scalare.

Dalle Eq.5.6 e 4.7 si ricava la Legge di Poisson:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad (5.9)$$

Se la densità di carica volumetrica è nulla la Legge di Poisson diventa la Legge di Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (5.10)$$

La soluzione esatta dell'equazione di Poisson o di Laplace è possibile solo nei casi in cui gli elettrodi hanno una geometria che è descrivibile con relazioni matematiche e il legame fra ρ ed \mathbf{E} è noto. Per i ben più comuni casi di elettrodi di forma complessa e sistemi di isolamento con più dielettrici si sfruttano le capacità di calcolo dei software basati sui metodi numerici di risoluzione delle equazioni differenziali.

In generale, il metodo agli elementi finiti è una tecnica numerica finalizzata a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendole ad un sistema di equazioni algebriche.

Uno dei concetti base su cui si fonda questo metodo di analisi è quello della discretizzazione del dominio continuo di partenza in un dominio discreto (mesh) mediante l'uso di primitive (elementi finiti) di semplice forma: triangoli o quadrilateri per domini 2D, tetraedri o esaedri per domini 3D.

Su ciascun elemento caratterizzato da una di queste forme elementari, la soluzione del problema di Laplace o di Poisson è espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma. I valori che la funzione assume nei nodi sono quelli che forniscono il minor errore su tutta la soluzione, ma non sono necessariamente i valori esatti della funzione in quei punti. Tipicamente la soluzione complessiva del problema viene approssimata con una funzione polinomiale a tratti: il numero di coefficienti che identifica la soluzione su ogni elemento è legato al grado del polinomio scelto e questo determina l'accuratezza della soluzione numerica stessa. L'Eq.5.11 mostra una funzione di forma polinomiale di primo grado: la sua adozione implica l'assunzione dell'ipotesi che il potenziale abbia un andamento lineare in ogni elemento della mesh e che al suo interno il campo elettrico sia costante.

$$V(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \rightarrow \text{elemento triangolare 2D} \quad (5.11)$$

I potenziali in tutti i vertici, nei quali non sia già stato assegnato il loro valore, vengono determinati, con approssimazione, imponendo il vincolo basato sul principio variazionale secondo il quale in un sistema isolato le configurazioni di equilibrio sono quelle e solo quelle per le quali è minima l'energia immagazzinata, ossia deve essere minima l'espressione:

$$W = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \nabla^2 V \, d\Omega = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] d\Omega = \rightarrow \text{minima} \quad (5.12)$$

Tale punto di minimo della energia immagazzinata viene identificato attraverso l'annullamento del differenziale dell'energia potenziale associata a quel campo: $dW=0$.

In questo modo, è possibile sostituire il problema della risoluzione di un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali, con il problema equivalente della determinazione del minimo di un integrale espresso da un'equazione algebrica.

La soluzione all'equazione differenziale alle derivate parziali di Poisson e di Laplace è unica solo se vengono assegnate delle condizioni al contorno che possono essere essenzialmente di due tipi:

1. Condizioni al contorno di Dirichlet \rightarrow viene vincolato il potenziale elettrico scalare V : quando $V=k$ allora \mathbf{E} ha solo componente normale al contorno.
2. Condizioni al contorno di Neumann \rightarrow viene vincolato il valore di $\frac{\partial V}{\partial \mathbf{n}} = \nabla V \cdot \mathbf{n} = 0$: allora dall'Eq.5.8 si deriva che \mathbf{E} ha solo componente tangenziale al dominio.

5.1.1. Impostazione della Simulazione

Il programma utilizzato per l'implementazione delle analisi di campo elettrico è *COMSOL® Multiphysics*. Operativamente la simulazione si articola in sei steps:

1. Importazione della geometria bidimensionale o tridimensionale da un formato CAD. (se è relativamente semplice la si può disegnare direttamente nell'ambiente di simulazione)
2. Assegnazione dei materiali, con relativo valore di permittività relativa, a tutti i domini del modello

3. Definizione delle condizioni al contorno: vincoli sul potenziale elettrico dei conduttori in tensione e sul collegamento a terra degli schermi (tipo Dirichlet)
4. Impostazione della mesh
5. Lancio del calcolo di simulazione
6. Post processing: grafici sul potenziale, sul campo elettrico, valutazioni di energia totale e di carica superficiale ecc...

A seguire vengono illustrati i quattro progetti su cui si sono effettuate le indagini sullo stress elettrico utilizzando il software FEM.

5.2. GIUNZIONE PER CAVO

Il manufatto in resina oggetto di quest'analisi fa parte di un più complesso sistema di giunzione per cavo.

I cavi comunemente usati per le applicazioni di media tensione sono a campo radiale: in essi si realizza un condensatore cilindrico fra lo schermo collegato a terra e il conduttore in tensione per fare in modo che le linee del campo elettrico siano sempre perpendicolari all'isolante, ottenendo così il massimo sfruttamento della rigidità dielettrica. In una tale configurazione il gradiente elettrico ha un andamento iperbolico all'interno dell'isolante e la zona più sollecitata è quella in prossimità del conduttore.

La struttura standard di un cavo a campo radiale per media tensione è così costituita:

1. *Guaina esterna*: serve a proteggere il cavo dagli stress meccanici, chimici e ambientali, ma non ha nessuna funzione di isolamento elettrico. Per le applicazioni con tensione superiore ad 1kV deve essere di colore rosso e può avere particolari caratteristiche in merito all'infiammabilità e alla propagazione della fiamma.
2. *Schermo metallico*: è necessario per qualsiasi tipologia di cavo con tensione superiore ai 5÷6 kV ed è costituito da fili o nastri di rame, rispettivamente per cavi unipolari o tripolari. Lo schermo metallico viene collegato a terra alle estremità del cavo e anche in corrispondenza delle sue giunzioni; deve avere una resistenza inferiore a 3 Ω /km e garantire una sezione sufficiente al passaggio della corrente che lo attraversa nel caso di un guasto a terra.
3. *Semiconduttivo esterno*: serve a migliorare l'interfaccia fra lo schermo di terra e l'isolante e a garantire l'assenza di vuoli che darebbero origine a fenomeni di scariche parziali. Non ha consistenza da poter drenare correnti elettriche ed è costituito da materiali a bassa conducibilità.
4. *Isolante*: è l'elemento del cavo destinato a sopportare la sollecitazione di tensione. Nelle applicazioni per media tensione è costituito da materiali elastomerici a base di gomma o di polietilene ottenuti per estrusione. I materiali isolanti attualmente utilizzati sono la gomma etilenpropilenica (EPR) e il polietilene con diverse densità e reticolazioni (XLPE, HDPE, LDPE).
5. *Semiconduttivo interno*: ha funzioni e struttura analoghe a quelle dello strato semiconduttivo interno.
6. *Conduttore*: può essere in rame, alluminio e leghe di alluminio, deve avere una sezione idonea a garantire il passaggio della corrente prevista senza dare luogo ad eccessivi fenomeni di riscaldamento; nella maggior parte delle applicazioni è costituito da un insieme di trefoli.

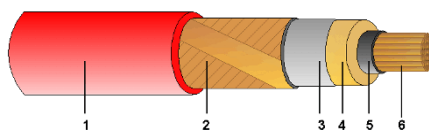


Fig. 5.3 struttura di un cavo per media tensione

La giunzione per cavo è un accessorio che consente di connettere i conduttori di due o più cavi, ripristinandone l'isolamento, la continuità elettrica dello schermo di terra e la protezione dagli agenti esterni. Una giunzione viene definita *dritta* quando si esegue sullo stesso tipo di cavo, mentre si indica come *mista* quando si esegue su cavi diversi per isolamento e/o configurazione di campo.

Un giunto di media tensione è costituito da:

- un connettore che garantisce la connessione metallica del conduttore
- un sistema di controllo del campo elettrico
- un corpo isolante
- degli schermi metallici che garantiscono il ripristino della continuità degli schermi dei cavi
- dei rivestimenti esterni che hanno funzione di protezione meccanica e/o di tamponamento

Le moderne giunzioni per cavo sono costituite da componenti preformati che vengono messi in opera seguendo in modo puntuale le indicazioni che il costruttore fornisce insieme all'accessorio. Questo garantisce maggiore affidabilità e facilità di installazione perché l'incidenza dell'esperienza e della manualità dell'operatore sul risultato finale viene ridotta rispetto a quanto avveniva in passato, quando si usavano i giunti con resina iniettata a freddo o colata a caldo.

In questo caso specifico la giunzione preformata di cui fa parte il corpo in resina epossidica oggetto di quest'analisi verrà connessa a due terminali di cavo del tipo illustrato in Fig.5.4.

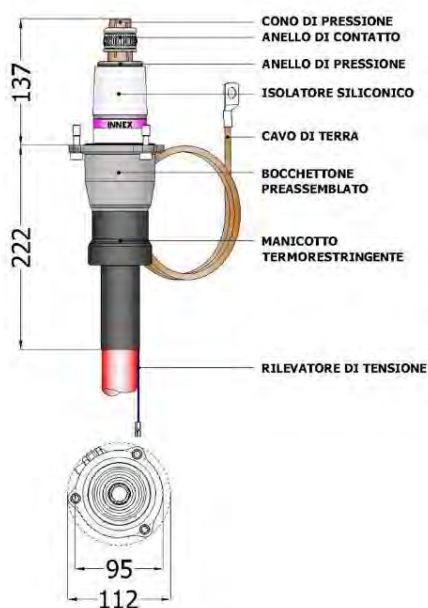


Fig. 5.4 terminale di cavo preassemblato che viene accoppiato alla giunzione

Le dimensioni del cono esterno del terminale e quelle del cono interno sagomato nel corpo in resina devono rispettare quanto prescritto della norma CEI EN 50181 riguardante gli

isolatori passanti ad innesto per apparecchi diversi dai trasformatori ad olio e per tensioni comprese fra 1 kV e 36 kV. In questo modo si garantisce la piena intercambiabilità elettrica e meccanica degli accessori per le connessioni e si assicura un montaggio appropriato. A seconda della tensione e della corrente nominale la norma distingue quattro tipi di interfaccia: la giunzione oggetto di quest'analisi si riferisce all'interfaccia 1 (12-24-36 kV ; 400-630 A) le cui quote dimensionali sono indicate in Fig.5.5.

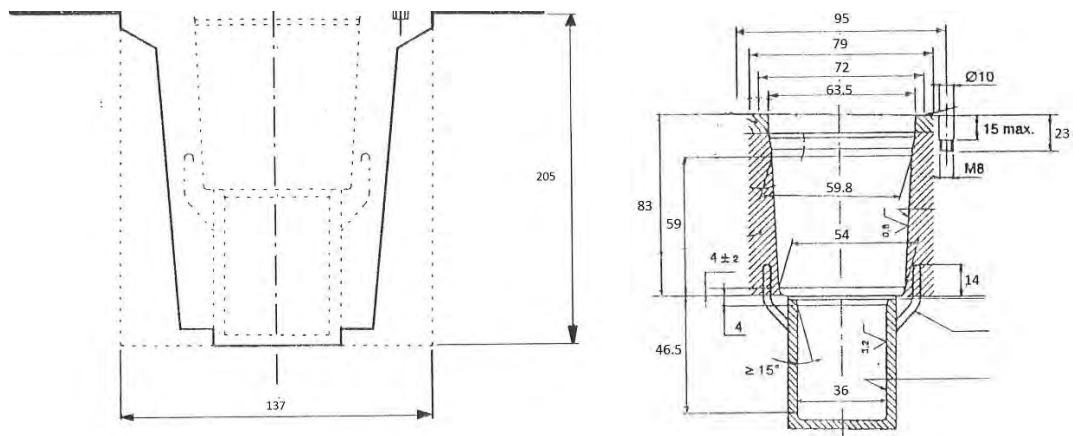


Fig. 5.5 dimensioni standardizzate della presa passante a cono interno

In Fig.5.6 si riporta il disegno del corpo isolante in resina epossidica, mentre la Fig.5.7 rappresenta lo schema della giunzione completa, rivestita da una guaina termorestringente nell'installazione finale. Le guaine termorestringenti sono realizzate in materiale elastomerico reticolato per radiazione elettronica: dal processo di polimerizzazione si origina una "memoria elastica" che sia attiva con il calore e che consente ai componenti di contrarsi fino ad un diametro predeterminato.

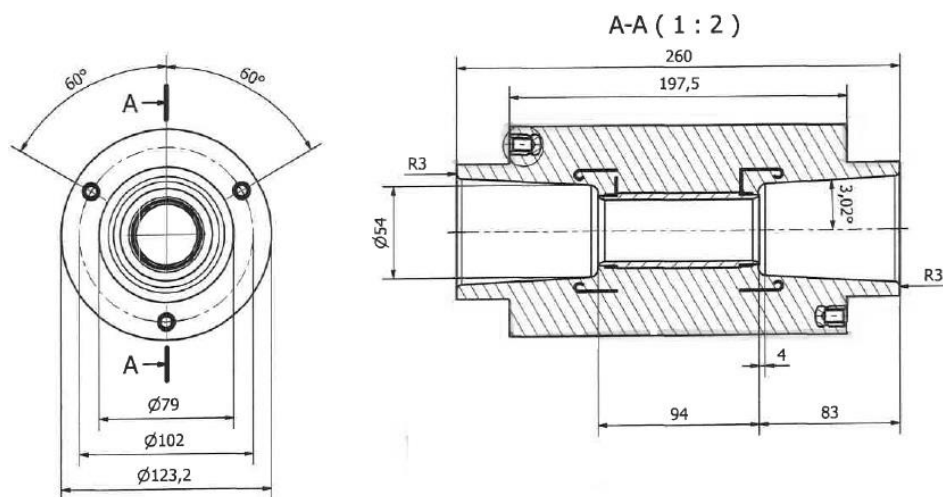


Fig. 5.6 corpo isolante della giunzione da 400A

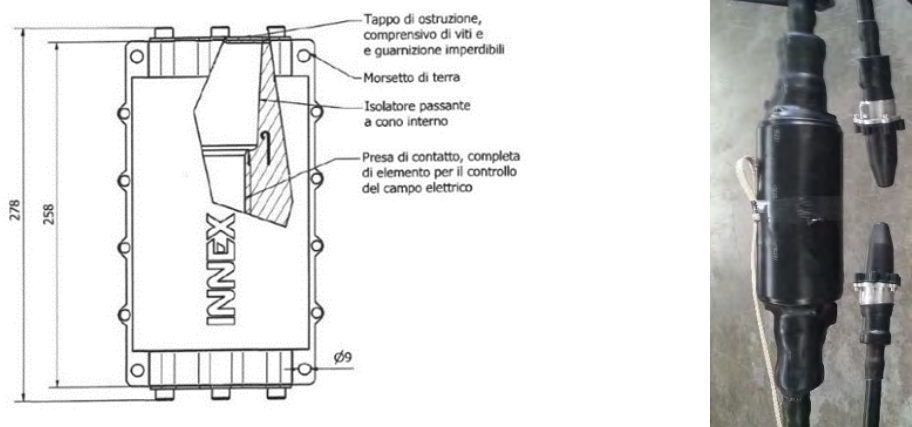


Fig. 5.7 giunto completo

Apparentemente un isolatore in resina di questo tipo non dovrebbe presentare particolari criticità. In realtà la messa in produzione ha evidenziato degli scarti elevatissimi: al collaudo elettrico, riferito alla norma IEC 60137 e realizzato in conformità alla norma IEC 60270, più del 50% dei pezzi è risultato scarto.

La norma IEC 60137 prescrive che l'isolatore venga innanzitutto sottoposto alla prova di tensione alla frequenza industriale. Il giunto in questione ha una tensione nominale di 24kV perciò la tensione di prova dovrà essere $U_M=50kV$: il test si considera superato se dopo un minuto di applicazione dello stress elettrico non si verificano scariche o perforazioni. Dopodiché si procede alla misura delle scariche parziali: la norma riporta i limiti in pC a due tensioni di riferimento, raggiunte durante la diminuzione della tensione dal livello della prova a frequenza industriale verso lo zero. I valori specifici per la classe 24kV sono riportati in Tab.5.1.

a)	$1.5 \cdot U_M / \sqrt{3}$	20.8 kV	10 pC
b)	$1.05 \cdot U_M / \sqrt{3}$	14.5 kV	5 pC

Tab. 5.1 valori massimi di scariche parziali per isolatori in resina epossidica colata o stampata

In Tab.5.2 si riportano i risultati dei collaudi di una fornitura critica: in evidenza i pezzi scarti.

Matricola	Innesco	Spegnimento	20.8 kV	14.5 kV
1419802001	36 kV	33 kV	90 pC	30 pC
1419802002	23 kV	13 kV	400 pC	200 pC
1419802003	35 kV	30 kV	2 pC	2 pC
1419802004	45 kV	21 kV	3 pC	2 pC
1419802005	45 kV	33 kV	2 pC	2 pC
1419802006	45 kV	28 kV	2 pC	2 pC
1419802007	24 kV	16 kV	1350 pC	2 pC
1419802008	29 kV	23 kV	7 pC	2 pC
1419802009	22 kV	15 kV	30 pC	5 pC
1419802010	33 kV	15 kV	60 pC	30 pC
1419802011	40 kV	35 kV	20 pC	4 pC
1419802012	32 kV	11 kV	80 pC	20 pC

Tab. 5.2 risultati del collaudo elettrico secondo IEC 60137 per una fornitura critica

Valori così elevati sono assolutamente inaccettabili per le specifiche del cliente finale, perciò si è resa necessaria una profonda revisione del progetto.

È presumibile che gli scarti che presentano valori di scariche parziali dell'ordine delle centinaia e delle migliaia di pC siano dovuti ad inclusioni gassose, ma valori inferiori a $80 \div 60 \text{ pC}$ non dipendono certo da difetti così macroscopici, come è stato confermato anche dalle analisi ai raggi X condotte sui alcuni pezzi scarti.

Valori di carica apparente inferiori al centinaio di picocoulomb potrebbero anche essere dovuti a distacchi microscopici della resina dalle parti metalliche inglobate. Alla luce di ciò si sono realizzati dei deflettori di campo sabbiati e degli altri con forellini passanti in modo da migliorare l'aggrappamento della resina: purtroppo non sono stati sufficienti a risolvere la criticità.

Si è pensato allora di ricoprire la superficie dei deflettori e dell'inserto centrale con una vernice conduttiva: in questo modo se la resina dovesse staccarsi dalla parte metallica si porterebbe dietro lo strato conduttivo, rendendo equipotenziale il vacuolo così creatosi. Questa lavorazione aggiuntiva potrebbe essere risolutiva, ma non si è certi che il mancato superamento del collaudo elettrico dipenda solo da questa problematica.

Per questo motivo, prima di procedere a una nuova campionatura, è stato ritenuto opportuno approfondire la criticità del progetto con un'analisi dei gradienti elettrici dell'assieme costituito dal corpo isolante e dal connettore.

La Fig.5.8 rappresenta la sezione longitudinale del corpo isolante in questione, di cui si evidenziano le componenti fondamentali:

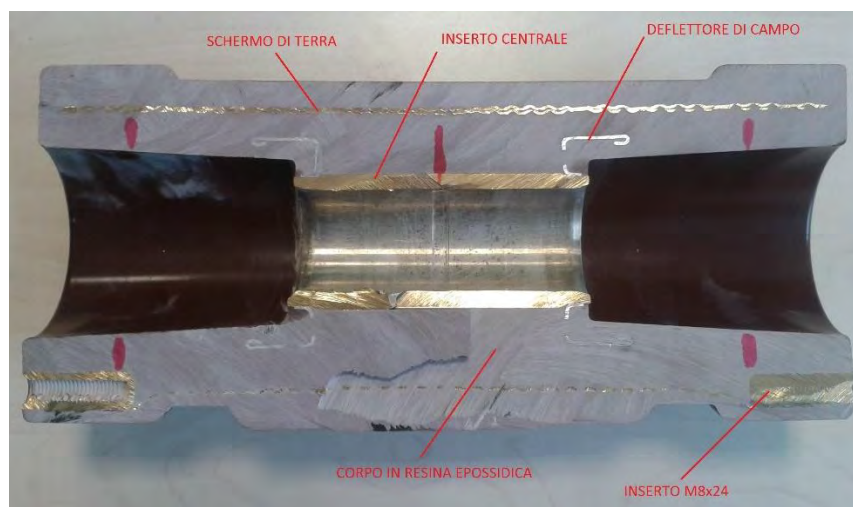


Fig. 5.8 sezione del corpo isolante – giunto 400A

Lo schermo di terra e gli inserti sono realizzati in ottone: la rete viene chiusa alle estremità e ancorata alle bussole mediante stagnatura. L'inserto centrale, sempre in ottone, serve a garantire la continuità elettrica; mentre i deflettori sono realizzati in ferro e servono a condizionare l'andamento delle linee di campo elettrico.

La simulazione è stata svolta basandosi sull'importazione di una geometria 2D assialsimmetrica.

Inizialmente sono state considerate tre configurazioni:

1. configurazione 1: schermo di terra fissato all'interno degli inserti e due deflettori di campo interrotti (come la sezione in Fig.5.9)

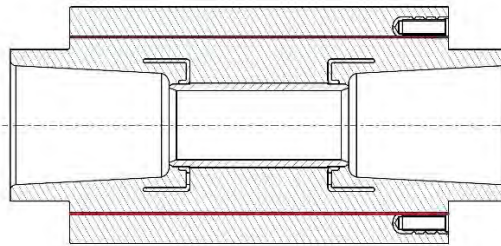


Fig. 5.9 soluzione 1

2. configurazione 2: schermo di terra fissato all'interno degli inserti e due deflettori di campo "abbracciati" da un altro schermo (come la sezione in Fig.5.10)

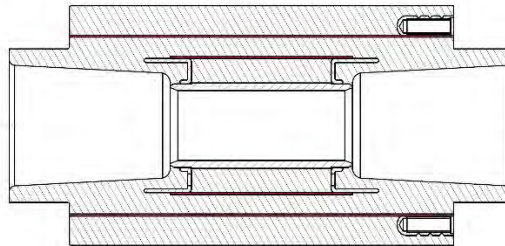


Fig. 5.10 soluzione 2

3. configurazione 3: senza schermo di terra e con due deflettori di campo interrotti (come la sezione in Fig.5.11)

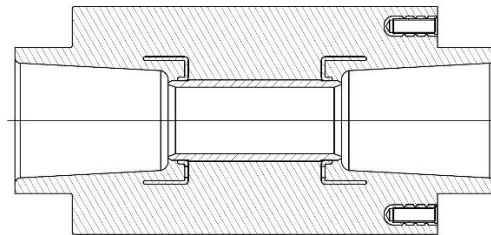


Fig. 5.11 soluzione 3

Per tutte e tre le configurazioni, l'analisi di campo è stata realizzata sulla geometria del giunto in accoppiata al terminale: in Fig.5.12 viene evidenziata la situazione dei materiali, in Fig.5.13 sono rappresentate le condizioni al contorno. La tensione delle parti attive è stata impostata a 24kV, che è la tensione media a cui innescano i fenomeni di scariche parziali emersi sui pezzi scarti.

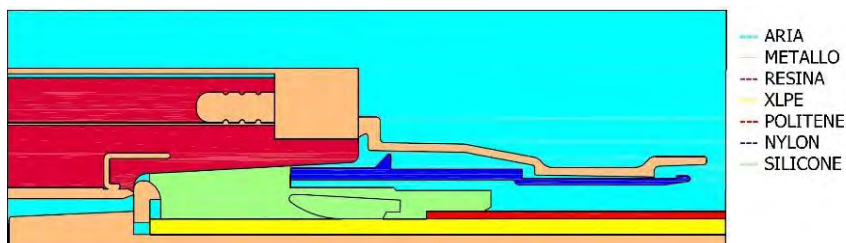


Fig. 5.12 materiali assegnati alla geometria oggetto di simulazione

Le costanti dielettriche relative corrispondenti sono:

Materiale	ϵ_r
Gomma Siliconica	3.3
Resina Epossidica	4
Aria	1
XLPE	2.2
Polietilene	2.3
Nylon	4

Tab. 5.3 costanti dielettriche relative dei materiali utilizzati

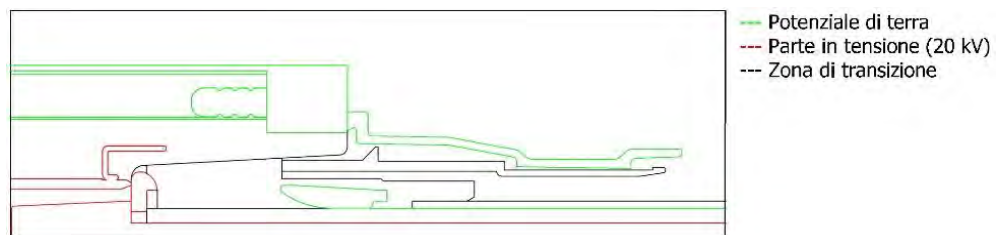


Fig. 5.13 condizioni al contorno

Come ci si poteva aspettare, la zona più critica nel corpo in resina è quella intorno al deflettore di campo. Dall'analisi delle tre soluzioni la meno sollecitata è la terza, come si evince da un rapido confronto dei risultati riportati in Fig.5.14-15-16:

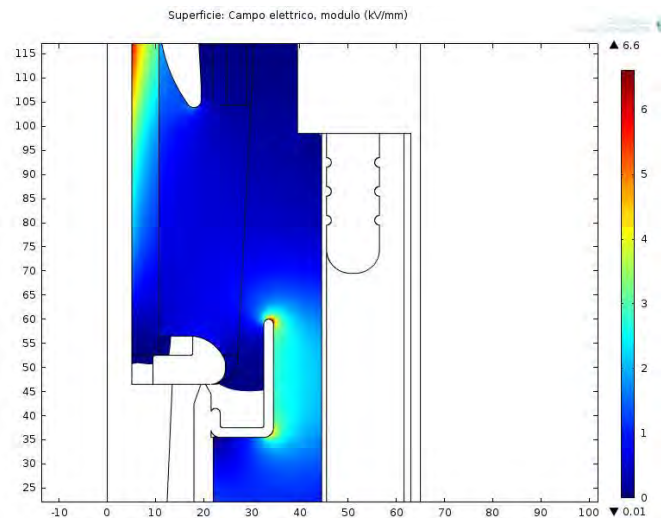


Fig. 5.14 configurazione 1 – gradiente elettrico

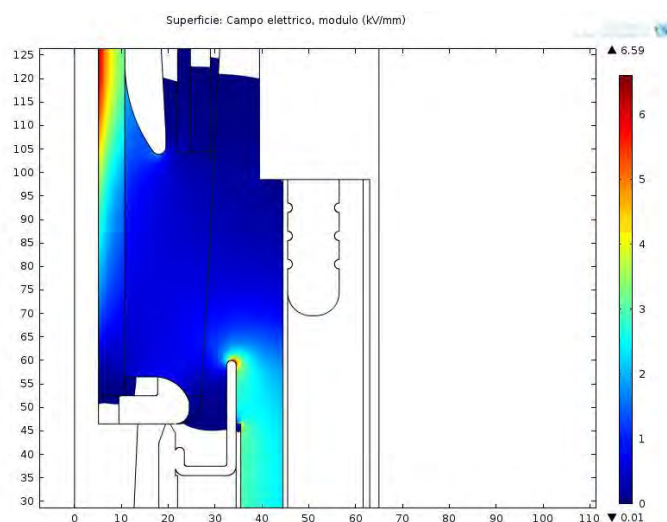


Fig. 5.15 configurazione 2 – gradiente elettrico

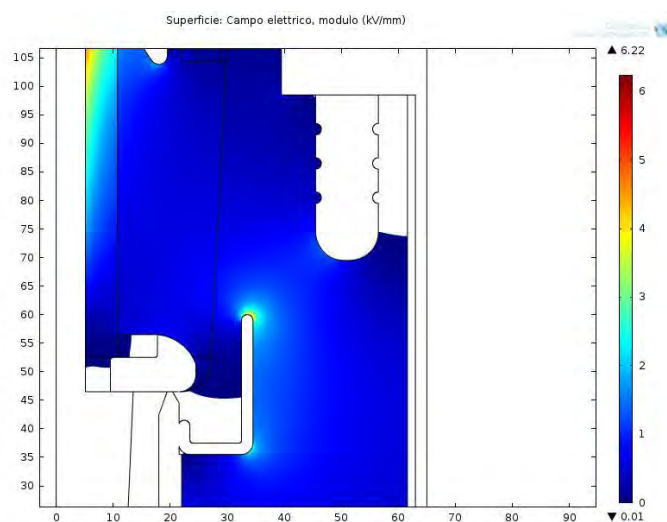


Fig. 5.16 configurazione 3 – gradiente elettrico

Sul deflettore, il valore massimo del campo elettrico è:

- ✓ sol.1: 6.664 kV/mm
- ✓ sol.2: 6.635 kV/mm
- ✓ sol.3: 4.879 kV/mm

NOTA: nelle soluzioni 1 e 2 il valore massimo dell'intera geometria simulata si trova sul deflettore di campo, nella soluzione 3 tale massimo si colloca sulla giunzione del cavo.

La soluzione 3 si rivela la più performante da un punto di vista elettrico, ma procedere ad una sua industrializzazione sarebbe abbastanza proibitivo. Infatti se volessimo eliminare lo schermo in rete di ottone fissato alle bussole, dovremmo procedere ad una metallizzazione completa della superficie laterale del giunto; pena l'impossibilità di collaudare i pezzi finiti. Una metallizzazione così estesa ha un'incidenza molto significativa sul costo finale dell'isolatore e lo porta oltre il target economico previsto; senza contare che verrebbero sottoposti a tale lavorazione aggiuntiva anche i pezzi difettosi, determinando un notevole spreco di risorse.

La soluzione 2 e la soluzione 1 presentano valori massimi del campo elettrico molto simili; tuttavia nella soluzione 2 il volume di resina interessato da un campo elettrico superiore ai 2kV/mm è molto più esteso rispetto alla soluzione 1. Ragionando in termini probabilistici, maggiore è l'estensione della zona sottoposta ad un campo elettrico non nullo, maggiore sarà l'incidenza dei difetti di stampaggio sul risultato del collaudo elettrico: per questo la prima configurazione è preferibile rispetto alla seconda.

Partendo da queste considerazioni è stato deciso di svolgere ulteriori simulazioni basate sulla configurazione 1, con lo scopo di individuare delle possibili modifiche alle geometrie delle parti metalliche inglobate che diminuiscano il gradiente elettrico nel corpo isolante.

La prima idea è stata quella di aumentare la raggiatura della parte terminale del deflettore di campo, come indicato nella Fig.5.17.

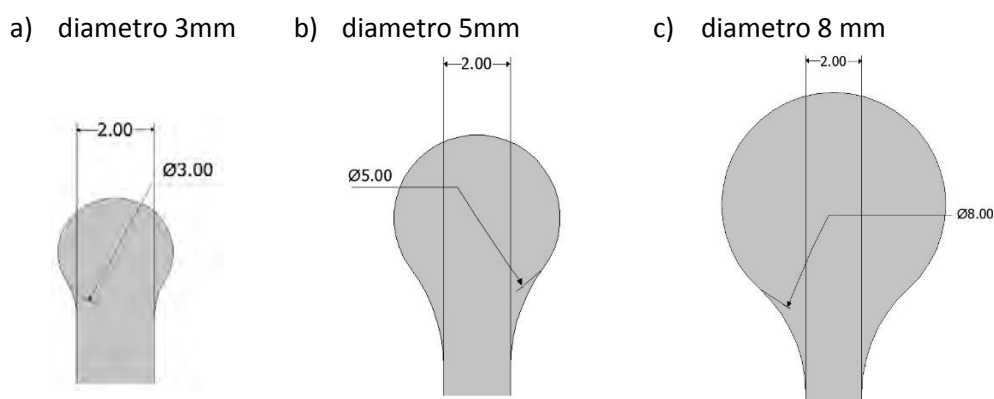


Fig. 5.17 modifica della parte terminale del deflettore

Restringendo il campo dati alle zone dove si riscontra un campo elettrico superiore ai 3kV/mm e impostando la scala colori a partire dalla stessa soglia si ottengono i risultati riportati in Fig.5.18-19-20.

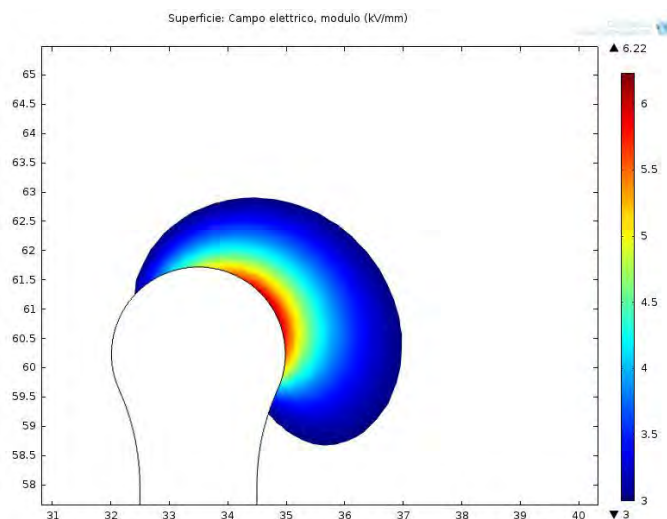
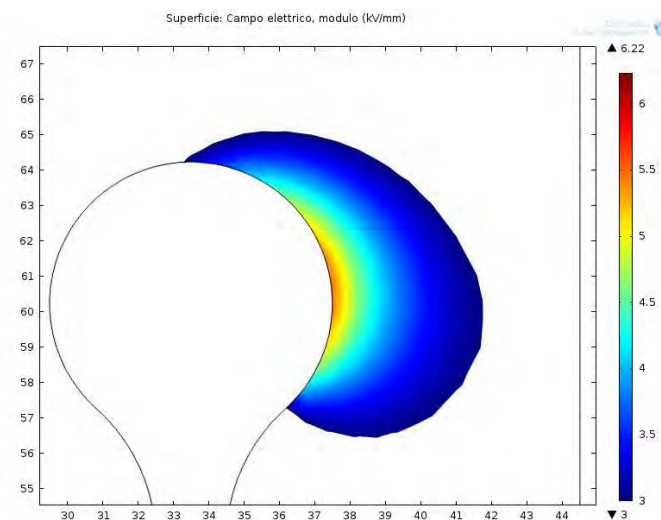
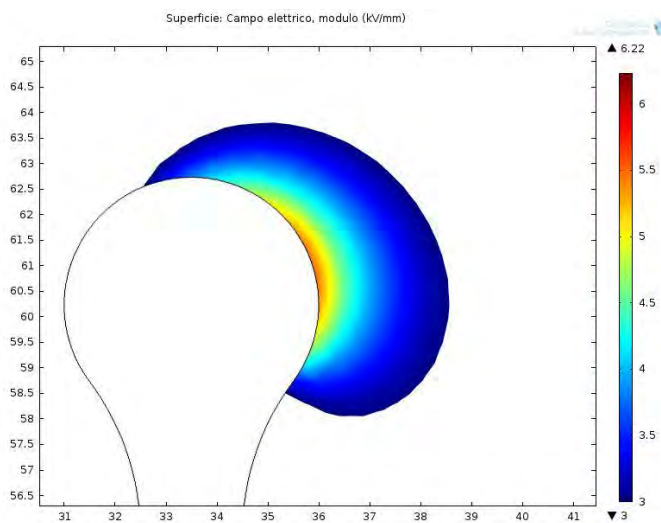


Fig. 5.18 curvatura 3mm



Si può vedere che aumentando la curvatura della terminazione del deflettore si abbassa il valore del campo massimo su di esso (zone rosse) anche se si aumenta il volume di resina interessato da campi superiori a 3 kV/mm (zona colorata).

Sul deflettore, il valore massimo del campo elettrico è:

- ✓ curvatura 3mm : 6.012 kV/mm
- ✓ curvatura 5mm : 5.556 kV/mm
- ✓ curvatura 8mm : 5.489 kV/mm

A questo punto è accertato che un aumento della curvatura dei bordi del deflettore di campo migliora il gradiente elettrico nella zona critica del corpo isolante. Si procede allora ad altre simulazioni, con l'obiettivo di individuare nuove configurazioni che permettano di ridurre il campo elettrico a valori inferiori a 3.5 kV/mm.

Un'altra possibilità per attenuare la sollecitazione elettrica nell'intorno del deflettore consiste nell'ancorare la rete di ottone che funge da schermo di terra alla parte esterna delle bussole in ottone. I risultati di Fig.5.21 mostrano che in questo modo il campo elettrico

supera i 3.5 kV/mm solo in una zona di 3-4mm; mentre il valore massimo del campo elettrico sul deflettore è di 5.025 kV/mm.

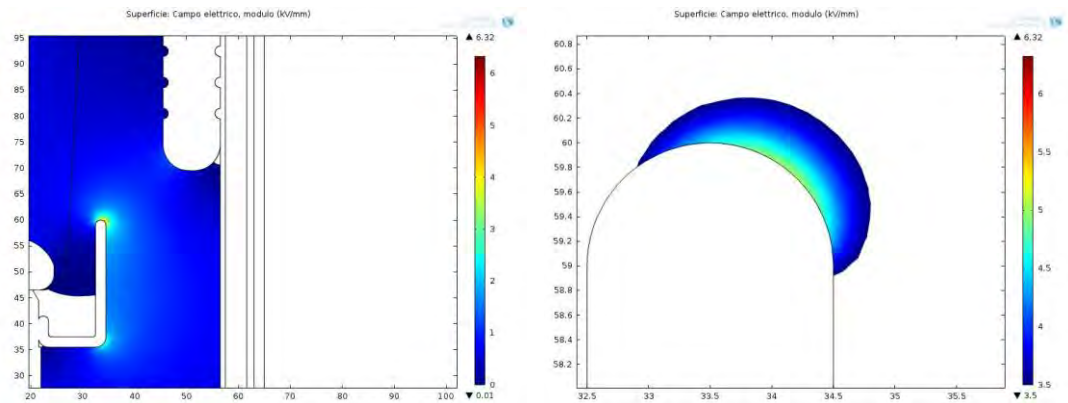


Fig. 5.21 schermo esterno alle bussole

Proviamo ad integrare la soluzione con lo schermo spostato a quella con il deflettore a curvatura maggiorata per raggiungere l'obiettivo di $E \leq 3.5 \text{ kV/mm}$.

Dai risultati si riscontra che in nessun punto del corpo isolante in resina epossidica si superano i 3.5kV/mm; adattando la scala dati/colori si vede che un volume minimo si trova sollecitato con più di 2.5 kV/mm; il valore massimo del campo elettrico sul deflettore è di 3.313 kV/mm.

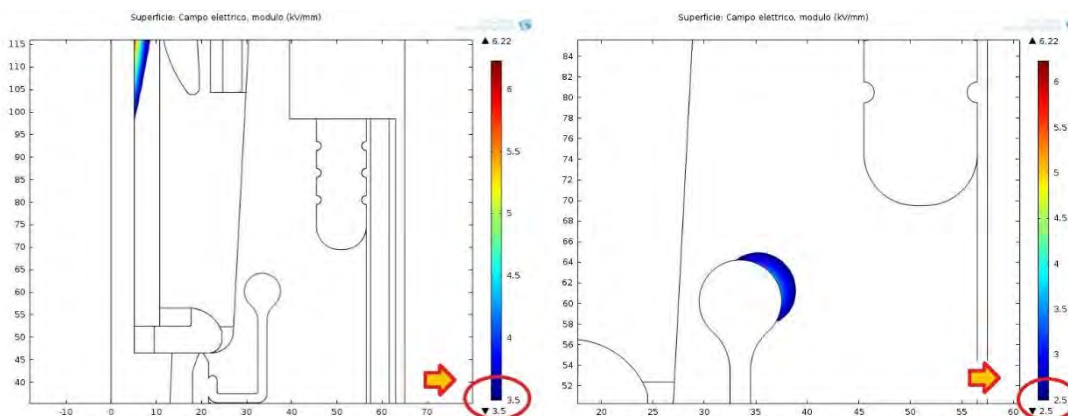


Fig. 5.22 curvatura 8mm + schermo esterno alle bussole

A questo punto l'obiettivo di ridurre il gradiente elettrico nel corpo in resina a valori inferiori a 3.5kV/mm è pienamente raggiunto: ora valutiamo la possibilità di soddisfare questo requisito con delle configurazioni più economiche. Infatti, dal punto di vista pratico, per realizzare la curvatura all'estremità del deflettore di campo dovremmo aggiungere un anello metallico come in Fig.5.23 che ovviamente incide sul costo finale dell'isolatore.



Fig. 5.23 dettaglio del deflettore di campo e dell'anello aggiuntivo che aumenta la curvatura del bordo

Analizziamo una configurazione con schermo esterno agli inserti M8, i quali vengono accorciati alla misura minima consentita di 12mm: questa soluzione è assolutamente plausibile in quanto alle bussole va semplicemente fissata una piccola flangia che non deve sostenere sollecitazioni meccaniche molto severe.

In questo caso non riusciamo a garantire $E \leq 3.5\text{kV/mm}$, come evidenziano i risultati di Fig.5.24 ; il valore massimo del campo elettrico sul deflettore è di 4.597 kV/mm .

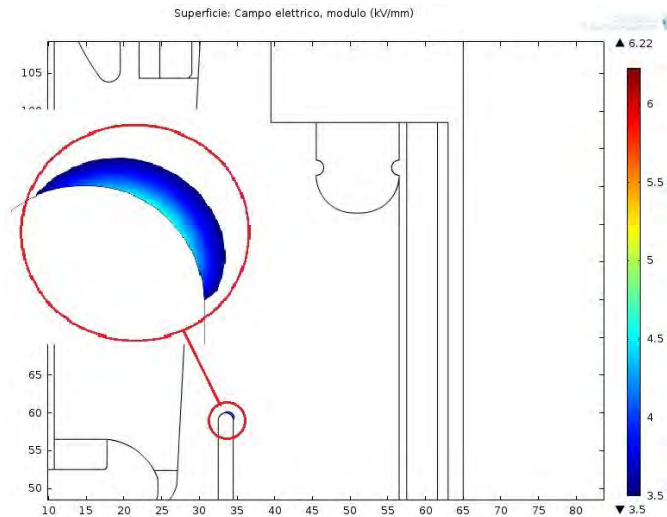


Fig. 5.24 schermo esterno alle bussole + bussola 12mm

Proviamo allora ad analizzare una configurazione che aggiunga alla precedente anche lo schermo con curvatura maggiorata.

I risultati evidenziano che in nessun punto del deflettore si superano i 3.5 kV/mm ; inoltre il volume sollecitato da campi superiori ai 2.5 kV/mm è più contenuto rispetto alla stessa configurazione con la bussola più lunga. Il campo elettrico massimo sul deflettore è di 3.107kV/mm .

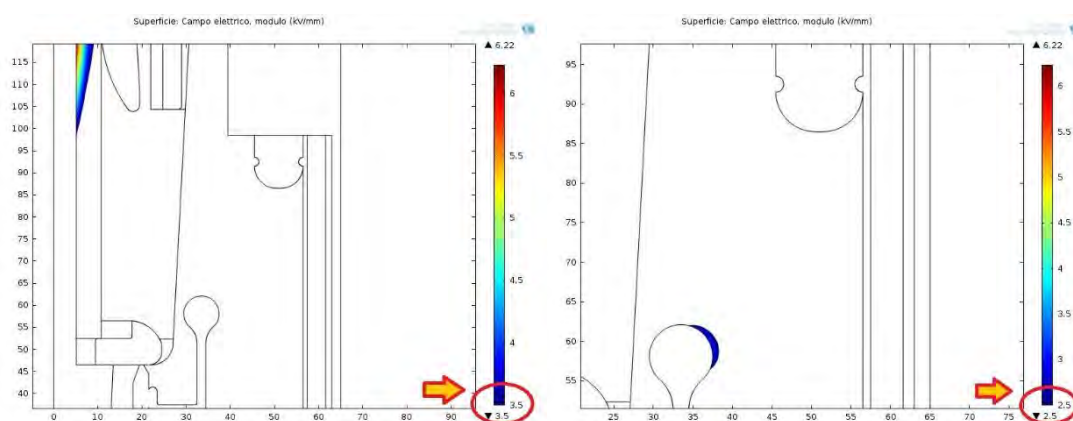


Fig. 5.25 bussola 12mm + schermo esterno alle bussole + curvatura 8mm

Riassumiamo i risultati fin qui ottenuti con lo schema di Fig.5.26.

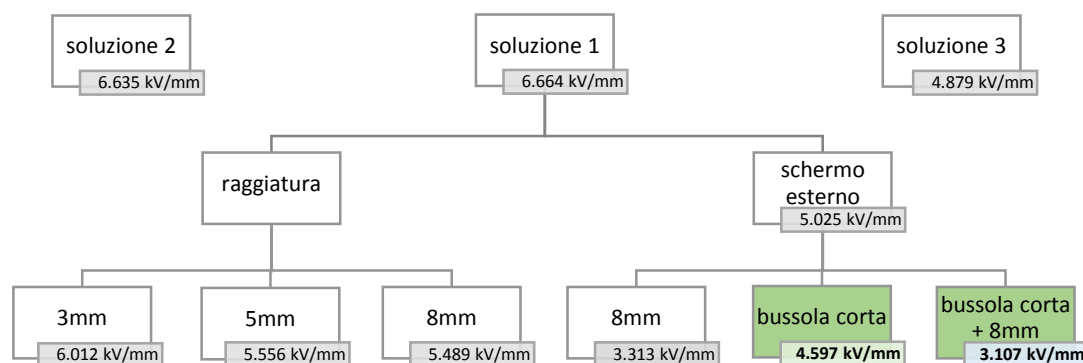


Fig. 5.26 simulazioni eseguite sul corpo isolante del giunto

Alla luce di ciò decidiamo di procedere ad una nuova campionatura di 12 pezzi:

- ✓ matricola da 1432812001 a -006 con la soluzione che prevede il posizionamento dello schermo di terra all'esterno degli inserti M8x12;
- ✓ matricola da 1432812007 a -009 con la soluzione che prevede il posizionamento dello schermo di terra all'esterno delle bussole M8x12 e l'aggiunta della raggiatura sui deflettori di campo;
- ✓ matricola da 1432812010 a -012 con la soluzione analoga ai precedenti e l'aggiunta della sabbatura sull'inserto centrale in ottone e sui deflettori di campo.

Per questa campionatura è stata utilizzata la mescola ISEPOX®280 avente una rigidità dielettrica intrinseca di 20÷25kV/mm, un fattore di perdita di 0.015 a 25°C, una costante dielettrica relativa compresa tra 3.50 e 3.70, una resistività di volume di $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ e una T_G variabile fra 110°C e 130°C.

Per quanto riguarda i parametri di stampaggio, le temperature impostate per lo stampo sono di 160°C – parte alta, 150°C – parte centrale, 140°C – parte bassa; il forno per il preriscaldamento degli inserti metallici e delle parti mobili dello stampo è programmato a 160°C; l'iniezione e la gelificazione si completano in 15 minuti. Il pezzo stampato è stato tenuto per 4 ore a 140°C per completarne la polimerizzazione.

Al collaudo elettrico secondo norma IEC 60137 tutti e 12 e pezzi sono risultati idonei, in Tab.5.4 si riportano i risultati del collaudo.

Matricola	Innesco	Spegnimento	20.8 kV	14.5 kV
1432812001	31 kV	28 kV	2 pC	2 pC
1432812002	30 kV	26 kV	2 pC	2 pC
1432812003	30 kV	25 kV	2 pC	2 pC
1432812004	30 kV	25 kV	2 pC	2 pC
1432812005	28 kV	24 kV	2 pC	2 pC
1432812006	30 kV	25 kV	2 pC	2 pC
1432812007	31 kV	23 kV	2 pC	2 pC
1432812008	30 kV	24 kV	2 pC	2 pC
1432812009	30 kV	24 kV	2 pC	2 pC
1432812010	33 kV	30 kV	2 pC	2 pC
1432812011	31 kV	26 kV	2 pC	2 pC
1432812012	31 kV	25 kV	2 pC	2 pC

Tab. 5.4 risultati dei collaudi elettrici secondo IEC 60137 sulla campionatura

Si può concludere che l'utilizzo delle simulazioni agli elementi finiti ha permesso di individuare delle soluzioni tecniche per la riduzione dello stress elettrico sulla resina epossidica che si sono rivelate efficaci per la diminuzione della percentuale di scarto al collaudo elettrico.

5.3. ISOLATORI PASSAMURO

La serie IPAN è costituita da una gamma di isolatori passanti per uso interno, diversamente dimensionati in modo da coprire un range di tensioni di isolamento da 12kV a 36kV e di correnti comprese fra 250A e 2000A.

La geometria dell'isolatore è di tipo 2D assial simmetrico: all'interno del corpo in resina epossidica è presente uno schermo collegato a terra per il controllo del gradiente del campo elettrico, utilizzabile anche come presa capacitiva per il monitoraggio della presenza di tensione.

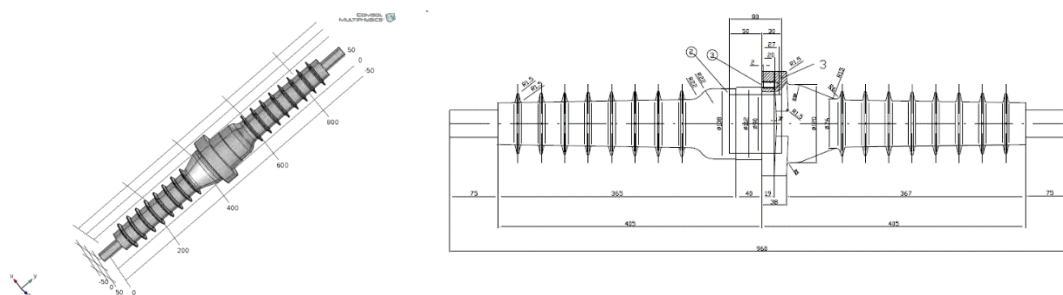


Fig. 5.27 geometria dell'isolatore passante - classe 36kV

Da questa serie di isolatori abbiamo estrapolato tre modelli di classe 36kV con diversi diametri del conduttore centrale in rame a seconda dell'ampereaggio richiesto:

- $\varnothing 30\text{mm} \rightarrow I = 1000 \text{ A}$
- $\varnothing 36\text{mm} \rightarrow I = 1500 \text{ A}$
- $\varnothing 42\text{mm} \rightarrow I = 2000 \text{ A}$

Lo schermo è uguale per tutti ed è costituito da una rete in ottone elettrosaldata da $\varnothing 90\text{mm}$ e $h=80\text{mm}$, ancorata a quattro inserti per il collegamento a terra.

Gli obiettivi della simulazione sono:

- valutazione della capacità presente fra conduttore e schermo
- valutazione del gradiente elettrico lungo l'interfaccia fra resina e aria

L'assegnazione dei materiali e delle condizioni al contorno sono rappresentate nelle figure seguenti. La permittività dielettrica della resina è stata scelta pari a 4.

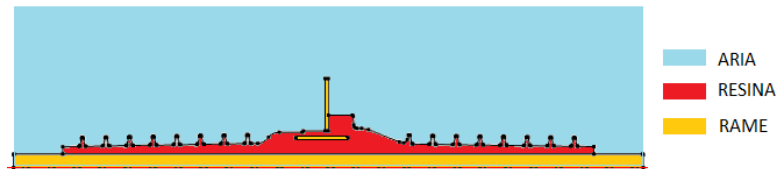


Fig. 5.28 assegnazione dei materiali alla geometria

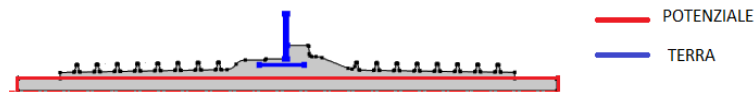


Fig. 5.29 assegnazione delle condizioni al contorno

5.3.1. Accoppiamento Capacitivo

Come si può vedere dalla Fig.5.30 ci sono dei marcati effetti di bordo alle estremità dello schermo: questo determina l'incremento dello stress elettrico sulla resina a contatto con le parti terminali dello schermo e un valore di capacità più elevato rispetto a quello ottenibile dall'applicazione della formula del condensatore cilindrico.

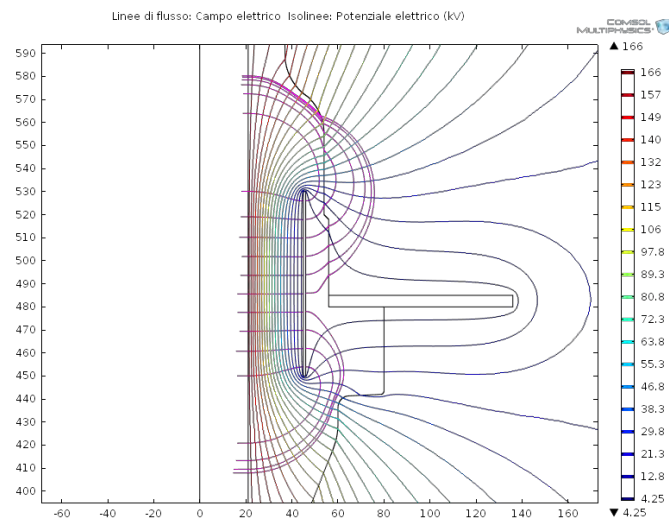


Fig. 5.30 disuniformità della sollecitazione elettrica ai bordi dello schermo

Dal post processing della simulazione la capacità si può valutare attraverso due strade:

$$C^* = \frac{2 \cdot U}{V^2} \quad (5.13)$$

$$C^{**} = \frac{Q}{V} \quad (5.14)$$

La tensione è nota dalle condizioni al contorno in entrambe le equazioni: nell'Eq.5.13 l'energia viene valutata con l'integrazione sul volume di resina della grandezza specifica corrispondente; nell'Eq.5.14 la carica viene valutata tramite il calcolo del flusso del vettore spostamento elettrico D sulla superficie chiusa definita dallo schermo collegato a terra.

In Tab.5.5 sono riportati i risultati ottenuti con potenziale pari a 36 kV.

diametro (mm)	U(J)	C* (pF)	Q (μC)	C** (pF)
∅30	0.01935	29.86	0.991893	27.55
∅36	0.02226	34.35	1.14519	31.81
∅42	0.02572	39.69	1.32725	36.87

Tab. 5.5 valutazione del valore di capacità

Per validare questi risultati sono state effettuate delle misure di capacità con il ponte di Schering, il cui circuito è rappresentato in Fig.5.31.

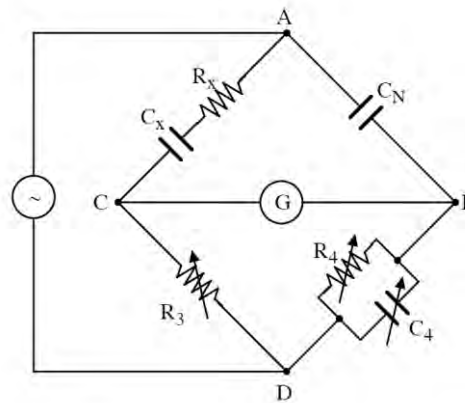


Fig. 5.31 schema circuitale del ponte di Schering

Il ponte di Schering viene impiegato in corrente alternata per misure di capacità e di $\tan\delta$, anche in alta tensione. Il risultato è indipendente dalla frequenza. Il ramo contenente R_x e C_x rappresenta l'impedenza incognita come circuito equivalente serie. Il ramo C_N rappresenta il condensatore campione in gas compresso da 100pF. Le resistenze R_3 ed R_4 e il condensatore C_4 sono regolabili a gradini: solitamente si mantiene fissa R_3 e si agisce su R_4 e C_4 per raggiungere facilmente l'equilibrio del ponte, ovvero la combinazione per cui il galvanometro segna zero.

$$\frac{1}{R_3} \left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) = -j \frac{1}{\omega C_N} \left(\frac{1}{R_4} + j \omega C_4 \right) \quad (5.15)$$

Uguagliando le parti reali si determina il valore di R_x :

$$R_x = \frac{R_3}{C_N} \cdot C_4 \quad (5.16)$$

Uguagliando invece le parti immaginarie si determina il valore di C_x :

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \quad (5.17)$$

È possibile anche stimare il valore del fattore di perdita come:

$$\tan(\delta) = \omega R_x C_x \quad (5.18)$$

In Tab.5.6 sono riportate le letture dei valori di resistenza e di capacità sul ponte in equilibrio per i tre isolatori considerati.

	C_4 (pF)	R_3	R_4	C_x (pF)
\varnothing 30 mm	0.027	2000	605.48	30.27
\varnothing 36 mm	0.061	2000	710.45	35.52
\varnothing 42 mm	0.016	2000	776.59	38.83

Tab. 5.6 letture del ponte di Schering in equilibrio

In Tab.5.7 si valuta la differenza fra i risultati delle simulazioni e i rilievi sperimentali.

	$ C^*-C_x $	$ C^{**}-C_x $
\varnothing 30 mm	0.414	2.724
\varnothing 36 mm	1.1725	3.7125
\varnothing 42 mm	0.8605	1.9595
media	0.8157	2.7987

Tab. 5.7 valutazione dell'errore fra i risultati delle simulazioni e i rilievi sperimentali

Si può notare che la valutazione della capacità attraverso il calcolo dell'energia (Eq.5.13) dà dei risultati più aderenti ai rilievi sperimentali rispetto a quelli che si ottengono quantificando la carica superficiale (Eq.5.14).

L'errore che si commette scegliendo una delle due opzioni per il calcolo della capacità (C^* e C^{**}) non è per niente costante al variare del diametro del conduttore interno: questo perché sia l'assemblaggio dello schermo che il processo produttivo sono soggetti a molte variabili di cui la simulazione non può tenere conto: ad esempio il corretto posizionamento degli inserti nello stampo, la variabilità della costante dielettrica della resina (da 3.7 a 4, come indicato nella scheda tecnica), la precisione delle dimensioni dello schermo. Perciò si può ipotizzare che gli isolatori per cui la differenza fra i rilievi di misura e i risultati di simulazione è più contenuta siano quelli la cui realizzazione pratica si avvicina di più al modello ideale su cui si basa l'analisi agli elementi finiti.

In ogni caso l'elaborazione dei risultati derivanti dalle analisi agli elementi finiti ci consente di avere un'indicazione sul valore di capacità fra conduttore e schermo molto più precisa rispetto a quella ricavabile dall'applicazione della formula del condensatore cilindrico che non tiene conto degli effetti di bordo.

$$C_{teo} = \frac{2\pi h \cdot \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)} \quad (5.19)$$

h=80mm
 R_{ext} =45mm
 $\epsilon_r = 4$
 $\epsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m

	R_{int}	C_{teo} (pF)	$ C_{teo}-C_x $
\varnothing 30 mm	15	16.20	14.07
\varnothing 36 mm	18	19.43	16.09
\varnothing 42 mm	21	23.36	15.47

5.3.2. Sollecitazione elettrica sull'interfaccia resina-aria

Valutiamo ora l'entità dello stress elettrico nell'interfaccia fra l'aria e il corpo in resina per determinare se c'è la possibilità che si sviluppi una scarica in aria.

Per nessuna delle tre varianti sul diametro del conduttore interno si riscontrano situazioni critiche alla tensione di esercizio: impostando un potenziale pari a $36 \cdot \sqrt{2}$ kV e valutando separatamente lo stress elettrico sui profili "superiore" e "inferiore" della parte alettata si ottengono campi elettrici massimi di poco superiori ai 10kV/cm.

Anche con il potenziale di $70 \cdot \sqrt{2}$ kV previsto per la prova a frequenza industriale non vengono superati i 22-24 kV/cm quindi non dovrebbe esserci nessun fenomeno di ionizzazione dell'aria che prelude a una scarica.

a)



b)

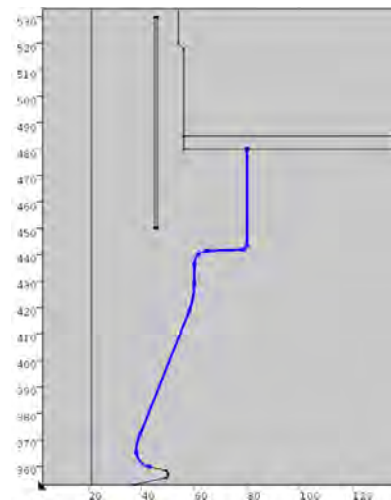
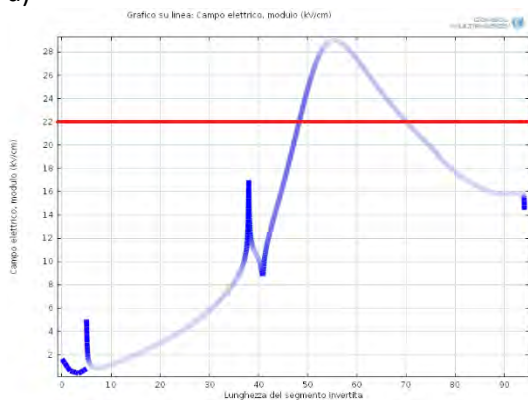


Fig. 5.32 valutazione della sollecitazione elettrica: a) alettatura superiore, b) alettatura inferiore

Settando il potenziale di simulazione a 170kV, valore di picco della forma d'onda 1.2/50μs della prova ad impulso per la classe 36kV, si riscontra un superamento della soglia di ionizzazione dell'aria (22-24 kV/cm) per un breve tratto dell'interfaccia fra resina e aria, sia sull'alettatura superiore che su quella inferiore, per tutti e tre i campioni.

a)



b)

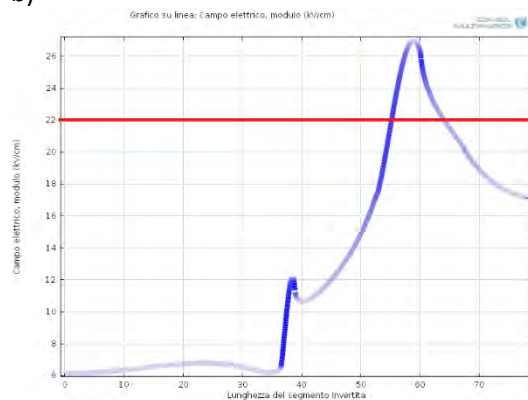


Fig. 5.33 valutazione della sollecitazione elettrica $\phi 30\text{mm}$ a 170kV: a) alettatura superiore, b) alettatura inferiore

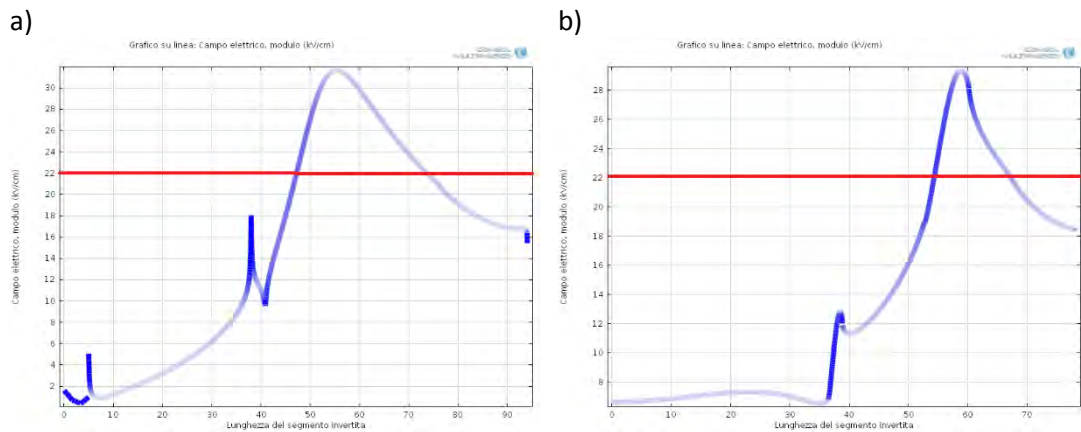


Fig. 5.34 valutazione della sollecitazione elettrica $\varnothing 36\text{mm}$ a 170kV: a) alettatura superiore, b) alettatura inferiore

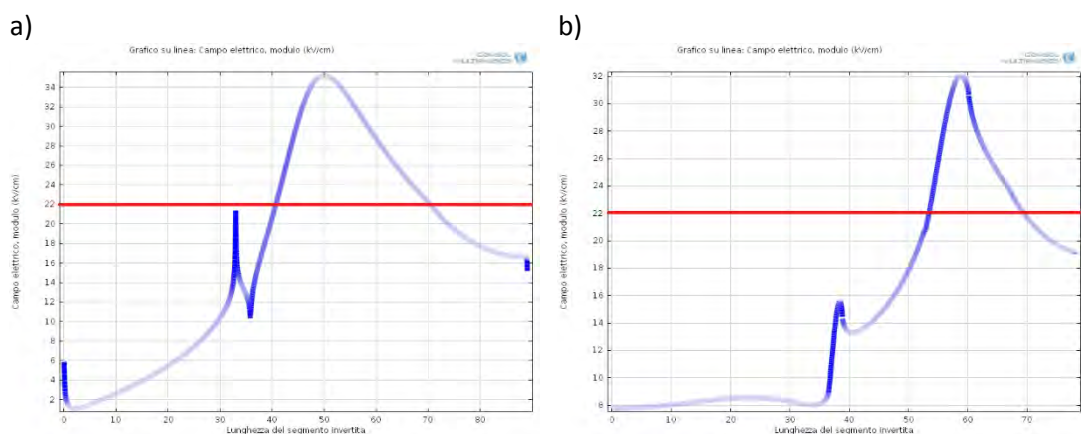


Fig. 5.35 valutazione della sollecitazione elettrica $\varnothing 42\text{mm}$ a 170kV: a) alettatura superiore, b) alettatura inferiore

Dal confronto delle Fig.5.33-34-35 si vede chiaramente che l'area compresa fra la curva del campo elettrico (blu) e il limite di ionizzazione dell'aria (rosso 22kV/cm) aumenta all'aumentare del diametro del conduttore interno.

Queste valutazioni qualitative non sono sufficienti ad esprimere una previsione di tenuta o di scarica dell'isolatore, ma i risultati della simulazione possono essere utilizzati come dati di partenza per una stima più precisa della possibilità di scarica basata sulla teoria di Townsend.

La formazione della scarica in un gas è determinata dalla moltiplicazione di cariche libere fino alla trasformazione del mezzo isolante interposto tra gli elettrodi in un mezzo conduttore. Le cariche libere primarie sono normalmente presenti nell'aria ambiente per effetto della radiazione cosmica e della radioattività naturale: esse si legano facilmente a molecole elettronegative (come vapor d'acqua o ossigeno) formando una popolazione di ioni negativi. Queste particelle cariche vengono accelerate dalla presenza di un campo elettrico e collidono con le molecole neutre, con una probabilità che dipende da natura, temperatura e pressione del gas. La ionizzazione del gas per effetto degli urti anelastici di ioni ed elettroni viene indicata come fase "fredda" della scarica; la fase "calda" si sviluppa invece in un secondo momento, se e quando l'alimentazione del circuito va a sostenere la ionizzazione nel percorso anodo-catodo determinando la comparsa fenomeni di termoionizzazione e di fotoionizzazione.

Accanto ai processi che portano all'aumento del numero delle cariche libere nel gas, esistono altri processi che portano alla loro riduzione o all'alterazione delle loro caratteristiche. La ricombinazione, ovvero la neutralizzazione della carica di due particelle di segno opposto che

collidono fra loro, è poco probabile nel caso della scarica in aria perché i tempi in gioco sono troppo ristretti. In tutti gas elettronegativi in genere sono molto più significativi i fenomeni di attaccamento, ovvero la “cattura” degli elettroni liberi da parte degli atomi o delle molecole con cui collidono. In seguito all’attaccamento la carica dell’elettrone non viene neutralizzata ma, risultando associata ad una particella più pesante, si riduce di molto la mobilità e quindi la possibilità di ionizzazione.

Townsend ha cercato di dare una formulazione quantitativa ai fenomeni della scarica in aria con due coefficienti specifici: α per la ionizzazione e η per l’attaccamento, definiti rispettivamente come il numero di cariche libere prodotte/catturate da un elettrone in un percorso di 1 cm nella direzione del campo applicato. I valori di α e di η normalizzati rispetto alla pressione del gas dipendono esclusivamente dal valore del campo elettrico ridotto (E/p). Sperimentalmente [52] si sono individuate delle definizioni del coefficiente α/p sufficientemente coerenti con i risultati delle prove.

Per valori di $E/p < 35$ V/cm·torr vale l’Eq.5.20.

$$\frac{\alpha}{p} = \exp\left(\frac{E/p - 58.2}{4.95}\right) \quad [cm \cdot torr]^{-1} \quad (5.20)$$

Per valori di E/p compresi fra 35 e 250 V/cm·torr vale invece l’Eq.5.21.

$$\frac{\alpha}{p} = \exp[Pol(E/p)] \quad [cm \cdot torr]^{-1} \quad (5.21)$$

Dove $Pol(E/p)$ è una funzione polinomiale i cui coefficienti sono riportati in Tab.5.8.

$a_0 = -0.64927 \cdot 10^2$	$a_5 = 0.56724 \cdot 10^{-6}$
$a_1 = 0.52642 \cdot 10^1$	$a_6 = -0.32780 \cdot 10^{-8}$
$a_2 = -0.20238$	$a_7 = 0.11739 \cdot 10^2$
$a_3 = 0.45178 \cdot 10^{-2}$	$a_8 = -0.23661 \cdot 10^{-13}$
$a_4 = -0.63081 \cdot 10^{-4}$	$a_9 = 0.20479 \cdot 10^{-16}$

Tab. 5.8 coefficienti della funzione polinomiale dell’Eq.5.21

Il valore del coefficiente η/p è invece calcolabile con l’Eq.5.22.

$$\frac{\eta}{p} = 1.95 \cdot \frac{\exp[-60 \cdot (p/E)]}{E/p} \quad [cm \cdot torr]^{-1} \quad (5.22)$$

Dal post processing dei risultati di simulazione è possibile esportare agevolmente le coppie (x, E) con E espresso in V/cm, relative ai grafici di Figg.4.33-34-35. Nota la pressione atmosferica $p=760$ torr si può calcolare il campo elettrico ridotto E/p e, a seconda del suo valore, superiore o inferiore ai 35 V/cm·torr, si ricava α/p con l’Eq.5.20 o con l’Eq.5.21; mentre per η/p è sempre valida l’Eq.5.22.

A questo punto si calcola $\alpha-\eta$: se la differenza è positiva vuol dire che la ionizzazione prevale sull’attaccamento, mentre se è negativa non c’è alcuna possibilità di moltiplicazione delle cariche libere.

Nel caso negli isolatori passamuro in esame, si riscontrano valori di $\alpha-\eta$ positivi per coordinate corrispondenti ai tratti con derivata positiva che superano il limite di ionizzazione dell’aria a 22kV/cm nelle Figg.4.33-34-35.

Per valutare il numero delle cariche libere presenti si devono integrare i valori di $\alpha-\eta$ nell’intervallo di coordinate in cui tale differenza è positiva.

$$N = N_0 \cdot \exp \left[\int (\alpha - \eta) dx \right] \quad (5.23)$$

Supponendo che non ci siano cariche libere già presenti, quindi $N_0=1$, se N supera 10^8 ci sono i presupposti per lo sviluppo di una scarica in aria.

Infatti secondo la "teoria streamer" quando si verifica una moltiplicazione che raggiunge le $10^8 \div 10^9$ cariche concentrate nella testa della valanga, il campo prodotto dalla carica è sufficiente a sostenere la ionizzazione anche quello circostante è più basso. Nel caso specifico di questi isolatori passamuro la situazione è complicata dal fatto che la zona dove si hanno i requisiti per la ionizzazione dell'aria non è in contatto con degli elettrodi per cui nessuna delle due cariche può neutralizzarsi: di conseguenza è più appropriato pensare ad una distribuzione di campo di dipolo piuttosto che quella di una carica sola. Si suppone quindi che dalla zona ionizzata sull'interfaccia resina-aria si sviluppi uno streamer in direzione della parte a terra più vicina con la formazione di un filamento ionizzato, il quale, una volta raggiunto un elettrodo metallico, consente lo sviluppo ulteriore verso il terminale in tensione.

Dall'elaborazione dei dati di simulazione emergono i risultati riportati in Tab.5.9.

diametro cond.	cariche libere alett.superiore	cariche libere alett.inferiore
∅ 30mm	10^0	0
∅ 36mm	10^{24}	10^1
∅ 42mm	10^{83}	10^{12}

Tab. 5.9 numero di cariche libere sull'alettatura "superiore" ed "inferiore"

L'isolatore passamuro con diametro del conduttore ∅ 30mm non dovrebbe scaricare con l'applicazione della tensione impulsiva con picco a 170kV. Questo risultato si è dimostrato valido anche alle prove sperimentali: il campione ha superato senza scariche i 15 impulsi di polarità positiva e i 15 impulsi di polarità negativa.

L'isolatore con diametro del conduttore ∅ 36mm potrebbe scaricare dal lato di applicazione dei bulloni (alettatura "superiore") ed è ciò che effettivamente accade durante la prova di tenuta ad impulso: si manifestano da quel lato delle scariche in aria sia con polarità positiva che con polarità negativa.

L'isolatore con diametro del conduttore ∅ 42mm potrebbe scaricare da ambo i lati, ma è più probabile che lo faccia dal lato dell'alettatura superiore perché ci sono più cariche libere: questo è ciò che effettivamente si verifica durante la prova ad impulso.

Riassumendo: i due isolatori con diametro del conduttore maggiore (∅ 36mm e ∅ 42mm) non sono nella condizione di superare la prova di tenuta ad impulso con forma d'onda 1.2/50 μS e $V_p=170kV$. Cerchiamo allora di variare la configurazione geometrica del passamuro per fare in modo di ridurre l'intensità del campo elettrico nell'interfaccia fra il corpo in resina e l'aria circostante. Ovviamente è molto più agevole modificare le dimensioni dello schermo metallico inglobato piuttosto che intervenire sullo stampo per ingrossare la parte in resina: quindi l'obiettivo è quello di individuare un diametro per la rete in ottone che consenta all'isolatore di non manifestare scariche in aria o perforazioni interne durante la prova di tenuta ad impulso.

Ipotizzando un diametro dello schermo che dagli attuali ∅ 90mm venga ridotto a ∅ 80mm si raggiunge una situazione in cui sia per il passamuro con diametro del conduttore interno ∅ 42mm che per quello con ∅ 36mm l'isolatore presumibilmente non dovrebbe scaricare in aria.

diametro cond.	cariche libere alett.superiore	cariche libere alett.inferiore
∅ 36mm	10 ⁰	0
∅ 42mm	10 ¹	0

Tab. 5.10 numero di cariche libere sull'alettatura "superiore" ed "inferiore" con diametro dello schermo interno ridotto

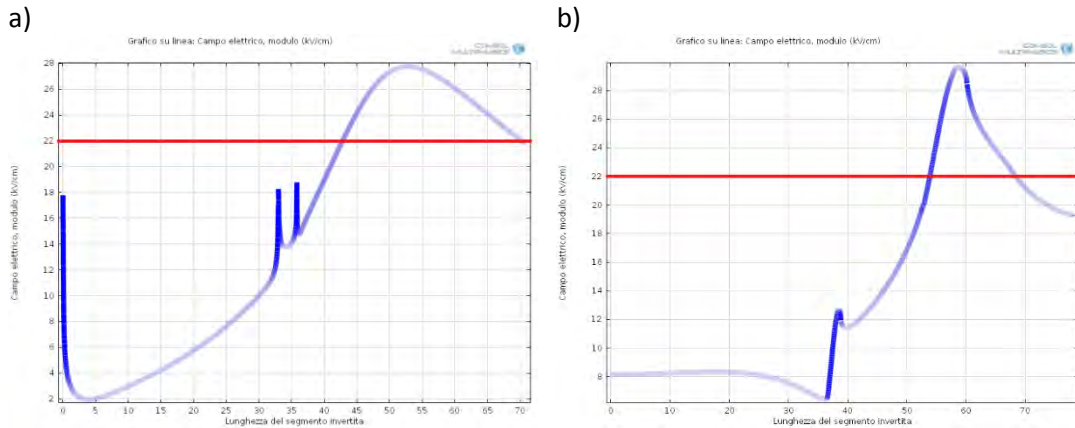


Fig. 5.36 valutazione della sollecitazione elettrica ∅42mm con diametro dello schermo ridotto a ∅80mm a 170kV: a) alettatura superiore, b) alettatura inferiore

Riducendo il diametro dello schermo interno a ∅ 80mm si aumenta lo stress elettrico nella porzione di resina compresa fra esso e il conduttore centrale: tuttavia alla luce dei risultati della simulazione il gradiente elettrico non sembra assumere valori critici per un'eventuale perforazione interna. Infatti le aree in cui il campo elettrico supera i 10kV/mm (limite cautelativo per la tenuta della resina alla perforazione a tensione impulsiva) sono limitate e non contigue.

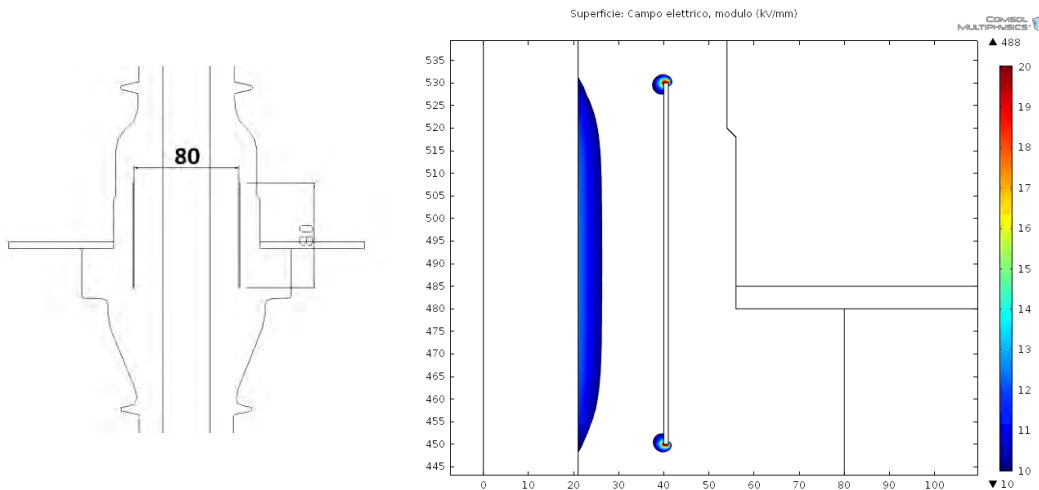


Fig. 5.37 stress elettrico superiore a 10kV/mm sul corpo in resina a 170kV con diametro dello schermo ∅80mm

La zona più critica risulta essere quella alle estremità della rete metallica: in questo caso lo stress elettrico potrebbe essere ridotto adottando una raggiatura della parte terminale. In questo modo il campo elettrico massimo sulla contorno dello schermo passa da 50 kV/mm (Fig.5.38a) a 24kV/mm (Fig.5.38b).

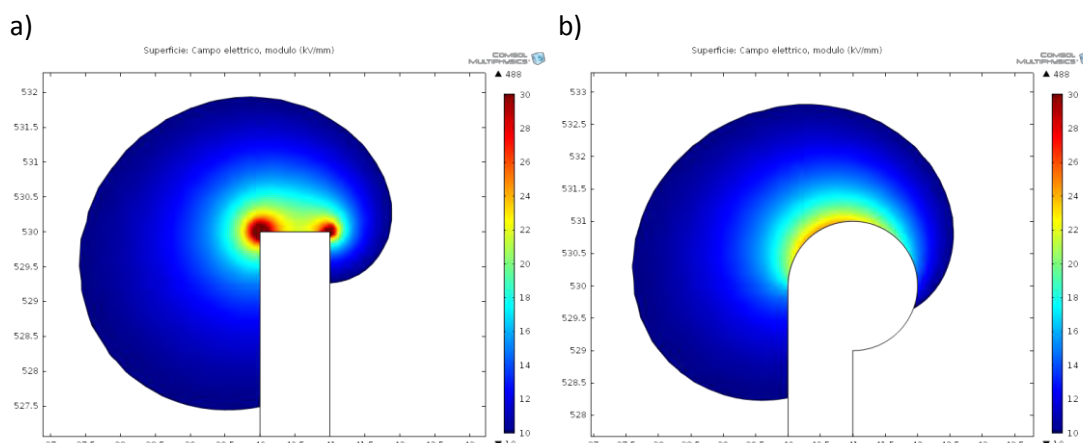


Fig. 5.38 stress elettrico a 170kV alle estremità dello schermo: a) config.originale ; b) config.raggiata

Un'altra soluzione praticabile è quella di eliminare lo smusso dal profilo dell'isolatore ed uniformare il diametro del corpo in resina non alettato a $\varnothing 112\text{mm}$.

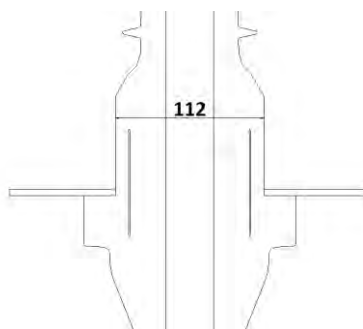


Fig. 5.39 aumento del diametro esterno del corpo in resina

Dai risultati riportati in Tab.5.11 si evince che anche questa seconda opzione dovrebbe eliminare le condizioni favorevoli allo sviluppo di una scarica in aria, anche se in modo meno efficace rispetto alla prima.

diametro cond.	cariche libere alett.superiore	cariche libere alett.inferiore
$\varnothing 36\text{mm}$	10^1	0
$\varnothing 42\text{mm}$	10^4	0

Tab. 5.11 numero di cariche libere sull'alettatura "superiore" ed "inferiore" con diametro del profilo in resina aumentato

Fra i campioni sottoposti alla prova ad impulso, uno di quelli con diametro del conduttore centrale di $\varnothing 36\text{mm}$ manifesta fenomeni di scarica più intensi rispetto ai suoi omologhi. Si può ipotizzare che questo comportamento anomalo dipenda da un errore di posizionamento dello schermo in fase di stampaggio: per verificare ciò il campione in questione è stato sottoposto ad un'analisi con i raggi X. Come si vede dalla Fig.5.40 l'estremità dello schermo non è in linea con la testa dell'inserto di ancoraggio alla flangia, come dovrebbe essere, ma è spostato verso il basso di circa 15mm.

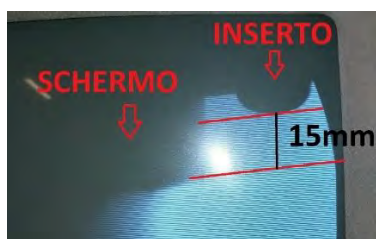


Fig. 5.40 immagine ai raggi X per individuare la posizione dello schermo

Simulando questa situazione con il software FEM ed elaborandone i risultati si conferma che il numero di cariche libere sull'alettatura "superiore" aumenta da 10^{24} a 10^{63} se lo schermo viene posizionato erroneamente come nel campione esaminato.

5.4. ISOLATORI PER IMS²⁷ DA PALO

Gli interruttori di manovra-sezionatori sono progettati per l'installazione all'esterno, su palo e sono idonei a condurre la corrente nominale, stabilire la corrente di corto circuito, interrompere la corrente nominale, provvedere al sezionamento di linee di media tensione.

Per definizione, l'interruttore di manovra è capace stabilire la corrente di corto circuito, portare ed interrompere la corrente in condizioni normali del circuito e sopportare per un tempo definito anche quelle di cortocircuito; non può essere utilizzato per la protezione del circuito in caso di guasto, in quanto è dotato di un potere di interruzione inadeguato rispetto all'entità delle correnti di cortocircuito.

Il sezionatore è un apparecchio in grado di assicurare da aperto una certa distanza di isolamento tra le parti in tensione; tuttavia deve essere aperto solo quando la corrente nel circuito è già stata interrotta ed essere chiuso prima che venga stabilita. In alcune applicazioni da palo è presente anche nella variante che permette la messa a terra delle parti in tensione: tale dispositivo è capace di sopportare per un tempo determinato le correnti di corto circuito, ma non è in grado di portare continuamente una determinata corrente.

L'attuale tecnologia costruttiva degli interruttori di manovra-sezionatori da palo è legata all'utilizzo del gas SF₆ alla pressione relativa di 0.3÷0.5bar quale mezzo isolante e di interruzione. L'esafluoruro di zolfo, gas non tossico, chimicamente inerte ed ininfiammabile, è universalmente noto per le sue elevate caratteristiche dielettriche e la sua elevata conduttività termica che gli consente di estinguere molto rapidamente un arco elettrico (cap.1); inoltre assicura un'elevata efficienza meccanica ed elettrica grazie all'usura molto contenuta dei materiali di contatto.

L'involucro metallico che contiene le parti attive è realizzato in acciaio inox a tenuta sigillata e garantita a vita, per il quale non è necessario nessun rabbocco di SF₆. L'involucro è dotato nella parte inferiore di una valvola di sovrappressione che garantisce l'evacuazione del gas in caso di aumento della pressione oltre i 2.5bar, con conseguente messa in sicurezza dell'apparecchio.

Sull'involucro vengono montati sei isolatori passanti esterno/interno che consentono l'allacciamento dei conduttori in ingresso e in uscita dall'IMS. Gli isolatori sono costituiti da un nucleo in resina epossidica, rivestito all'esterno da alettature in gomma silconica (Fig.5.41).

²⁷ Interruttori di Manovra-Sezionatori



Fig. 5.41 isolatori passanti con nucleo in resina epossidica e rivestimento in gomma siliconica

La parte in resina epossidica conferisce solidità meccanica all'isolatore ed è fondamentale affinché il pezzo resista all'applicazione di un momento flettente alla base di attacco di 250Nm, come previsto dalla specifica ENEL DY1806²⁸. Il materiale termoindurente garantisce anche una perfetta tenuta al gas in accoppiata con l'o-ring in EPDM. L'involucro alettato in gomma siliconica deve poter resistere agli stress elettrici ed ambientali, nelle normali condizioni di esercizio, senza dare luogo a processi di degradamento come tracking o perforazioni; inoltre deve evitare il trasferimento di umidità dall'esterno verso le parti interne e non deve essere infiammabile. L'involucro esterno deve avere una geometria tale da rispettare il valore minimo della linea di fuga prevista per la specifica combinazione di geometria, tensione e livello di inquinamento (vedasi cap.3); in modo tale da poter garantire la tenuta superficiale dell'isolatore anche in condizioni di inquinamento, simulate dalle prove di salinità prescritte dalla norma IEC 60507²⁹.

L'isolatore composto nel suo complesso deve essere sottoposto anche ad una prova d'invecchiamento accelerato secondo la norma IEC 61109 (vedasi 3.1.3).

I modelli di IMS per media tensione sono disponibili sia nella versione 24kV che in quella 36kV e possono avere comando manuale oppure motorizzato. La versione motorizzata si usa nell'ambito di un sistema di telecontrollo costituito da una serie di unità periferiche che, nel caso di apparecchi montati su palo, vengono spesso alimentate da un trasformatore di tensione MT/BT monofase collegato a monte dell'IMS. Per un efficace monitoraggio da remoto è necessario che le unità periferiche trasmettano al sistema centrale i dati di tensione e corrente relativi al punto di installazione delle stesse: per questo nei modelli più sofisticati di IMS gli isolatori passanti vengono dotati di presa capacitiva per la misura di tensione (Fig.5.42a) ed equipaggiati di una trasformatore amperometrico per la misura di corrente (Fig.5.42b).

²⁸ DY 1806: interruttore di manovra-sezionatore da palo isolato in SF₆, prescrizioni per la costruzione ed il collaudo

²⁹ IEC 60507 Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems

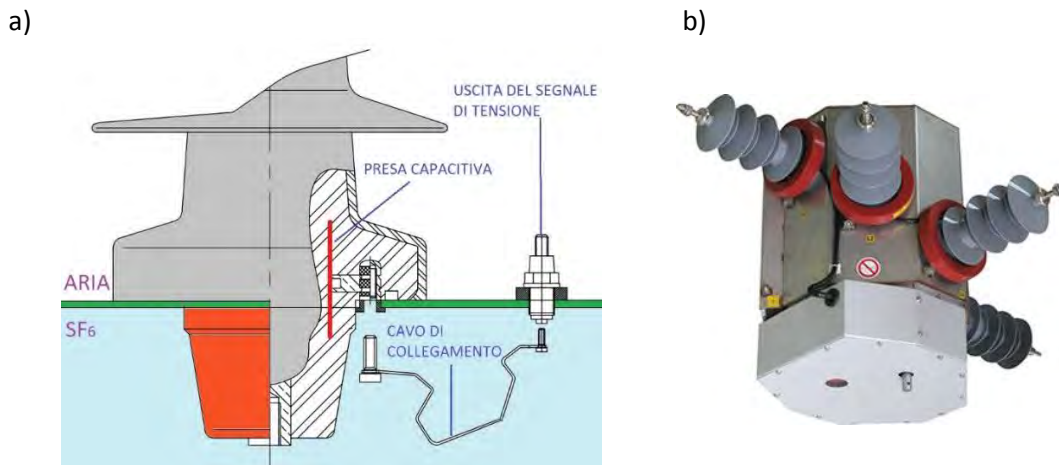


Fig. 5.42 sensori di tensione (a) e di corrente (b) montati su un IMS da palo

L'isolatore recloser-THO, oggetto di quest'analisi, è un isolatore passante facente parte del progetto di un IMS da palo molto innovativo. L'idea di base consiste nel realizzare il sezionamento in aria secca e l'interruzione con ampole in vuoto incapsulate nel corpo in resina di ciascun isolatore passante: con questa soluzione si elimina del tutto l'utilizzo dell' SF_6 e i problemi di carattere ambientale ad esso correlati.

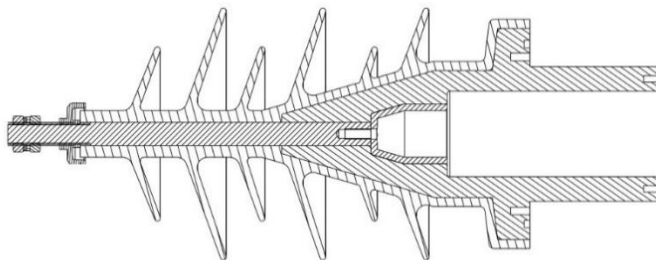


Fig. 5.43 isolatore THO innovativo

L'IMS su cui andrà installato questo nuovo passante verrà gestito in telecontrollo, perciò l'unità periferica dovrà poter disporre dei segnali di tensione e di corrente relativi al nodo di installazione.

Il progettista ha scelto di dotare ciascun isolatore passante di due TA con rapporti di trasformazione diversi (300/1 e 600/1) ma stessa potenza apparente (5VA). Per realizzare ciò si può pensare sia all'utilizzo di due TA separati, montati all'esterno (Fig.5.44a) o all'interno (Fig.5.44b) del cassone in acciaio, oppure è possibile realizzare un unico trasformatore amperometrico che realizzi entrambi i rapporti. Tutti i TA proposti sono isolati in Mylar® e verranno inglobati in gomma silconica.

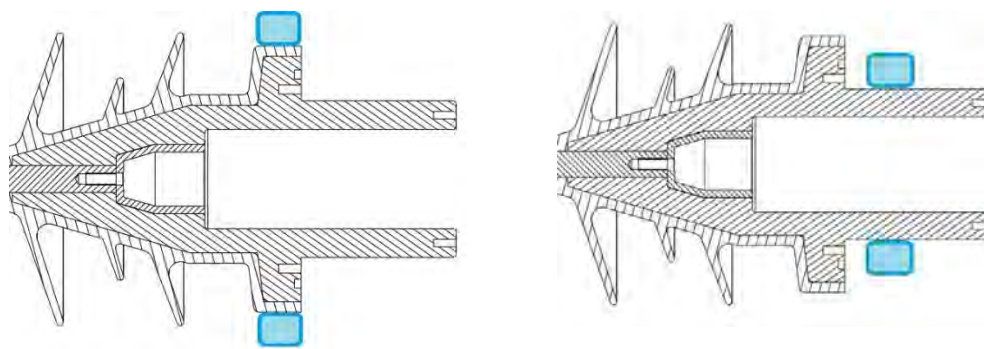


Fig. 5.44 possibili posizioni della sonda Rogowski: a) esterna , b) interna

Le simulazioni con il software *COMSOL*® su questa tipologia di isolatore perseguono due obiettivi:

1. Valutare il comportamento dello schermo capacitivo per il prelievo del segnale di tensione
2. Individuare le zone sottoposte alla maggior sollecitazione elettrica e prevedere il limite di tenuta per la prova a frequenza industriale e ad impulso atmosferico.

I materiali assegnati alla geometria di questo isolatore passante sono rappresentati in Fig.5.45.

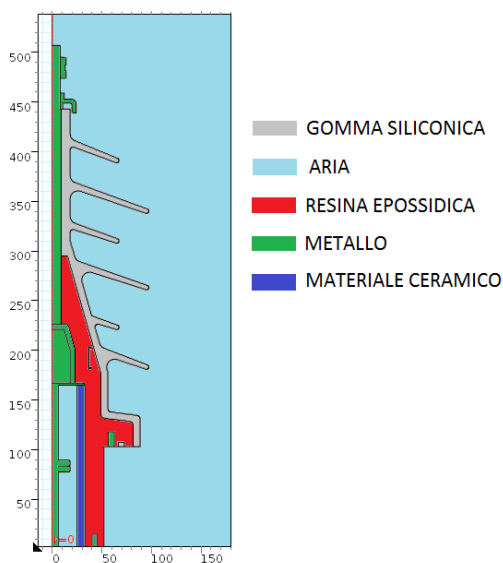


Fig. 5.45 materiali assegnati alla geometria oggetto di simulazione

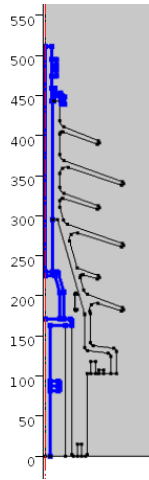
Le costanti dielettriche relative corrispondenti sono:

Materiale	ϵ_r
Gomma Siliconica	2.7
Resina Epossidica	4
Aria	1
Mat.Ceramico	4.2

Tab. 5.12 costanti dielettriche relative dei materiali utilizzati

Le condizioni al contorno sulla geometria sono:

CONTORNI IN TENSIONE



CONTORNI A TERRA

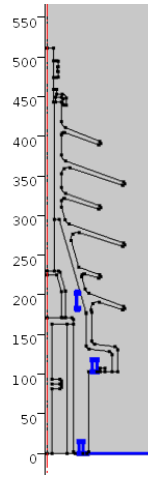


Fig. 5.46 condizioni al contorno

Sono stati vincolati al potenziale di terra anche i lati esterni del rettangolo d'aria che circonda l'isolatore.

5.4.1. Accoppiamento Capacitivo

Per quanto riguarda il monitoraggio della tensione, questo IMS innovativo richiede la presenza di una presa capacitiva inglobata nel corpo di resina. Le specifiche sulla capacità da realizzarsi fra il conduttore in tensione e lo schermo a terra sono:

- 5÷15 pF con tolleranza del ± 2%
- categoria di temperatura di funzionamento -50°C → +80°C
- coefficiente di temperatura TC 100÷150 ppm/°C

Posizionando lo schermo come indicato in Fig.5.47 e facendo riferimento alla nota formula di calcolo della capacità di un condensatore cilindrico, si otterrebbe un valore di capacità di 9.80pF.

$$C = \frac{2\pi h \cdot \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)} = 9.80 \text{ pF}$$

h=22mm
 R_{ext}=36.5mm
 R_{int}=23mm
 ε_r = 3.7
 ε₀=8.854·10⁻¹² F/m

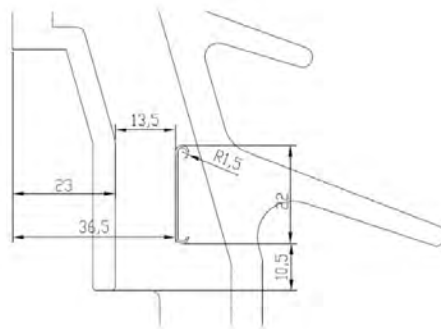


Fig. 5.47 posizione della presa capacitiva

Tuttavia la geometria della presa capacitiva in questione non è completamente assimilabile a quella di un condensatore cilindrico e perciò gli effetti di bordo hanno un'incidenza determinante sul valore di capacità effettiva. Per questo è opportuno valutare la capacità offerta dal posizionamento dello schermo attraverso l'elaborazione dei risultati di un'analisi agli elementi finiti.

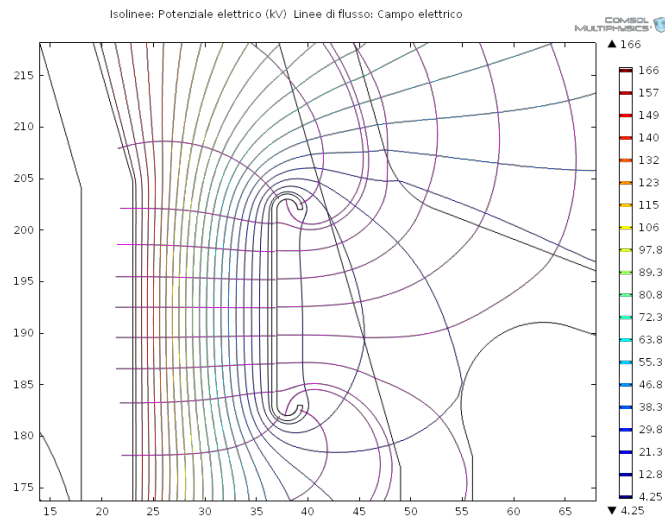


Fig. 5.48 effetti di bordo sulla presa capacitiva

Come si è visto per il caso degli isolatori passamuro (vedasi 4.3) la capacità può essere valutata in due modi diversi:

$$C^* = \frac{2 \cdot U}{V^2} \quad (5.24)$$

$$C^{**} = \frac{Q}{V} \quad (5.25)$$

La tensione è nota dalle condizioni al contorno in entrambe le equazioni: nell'Eq.5.24 l'energia viene valutata con l'integrazione sul volume di resina della grandezza specifica corrispondente; nell'Eq.5.25 la carica viene valutata tramite il calcolo del flusso del vettore spostamento elettrico \mathbf{D} sulla superficie chiusa definita dallo schermo collegato a terra, rappresentata dalla selezione in blu di Fig.5.49.

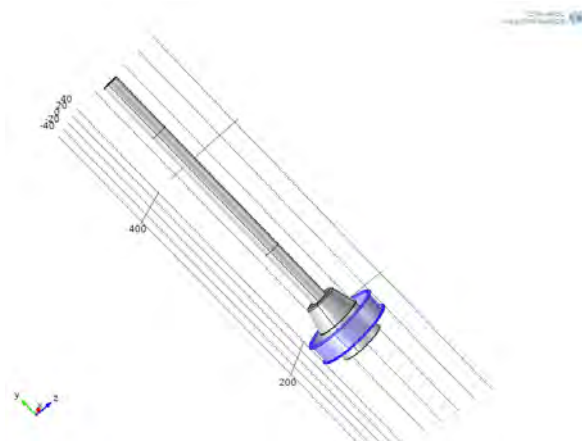


Fig. 5.49 dominio superficiale per il calcolo della carica

La tensione può essere scelta arbitrariamente in quanto il valore di ϵ_r , a cui è legata l'energia e la carica con cui si calcola la capacità, è invariante rispetto al potenziale applicato come condizione al contorno (vedasi 2.4.1): scegliamo 125 kV per avere valori di U e di Q più consistenti.

Per un valore di permittività relativa della resina pari a 4, riportato dalla scheda tecnica del prodotto ISEPOX®280 e inserito come dato nella definizione del materiale per la simulazione, si ottengono questi risultati:

C*=19.031 pF	U= 0.14868 J
	V=125 kV
C**=18.808 pF	Q=2.351 μ C
	V=125 kV

Tab. 5.13 valore di capacità determinato dai risultati delle simulazioni

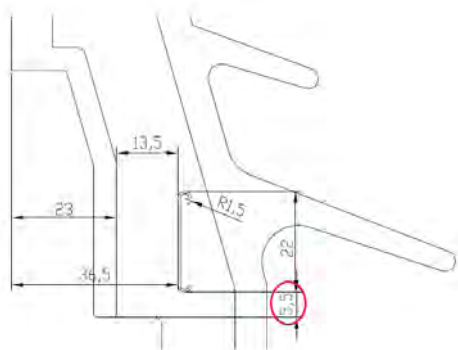
Innanzitutto si nota come i valori di capacità derivanti dalla simulazione e che perciò tengono conto degli effetti di bordo, sono quasi il doppio rispetto a quelli ottenibili dall'applicazione della formula del condensatore cilindrico; inoltre si apprezza la differenza minima fra il risultato ottenuto dall'applicazione dell'Eq.5.24 e quello della Eq.5.25.

I rilievi sperimentali di capacità, ottenuti con un RCL-meter, sono riportati in Appendice A: si vede che c'è un'ottima corrispondenza fra il post processing della simulazione e le misurazioni sui campioni. La media delle differenze fra la capacità misurata e quella valutata con l'energia totale è pari a 0.509pF; mentre quella con la carica sulla superficie dello schermo è di 0.244pF. Entrambi i valori sono molto contenuti quindi si possono considerare validi i risultati ricavati dalle simulazioni.

La capacità misurata sui pezzi prodotti dalla campionatura evidenzia però un mancato raggiungimento del target di 5÷15 pF. A questo punto è possibile sfruttare lo strumento di simulazione per individuare un geometria dello schermo che ci permetta di diminuire di qualche pF l'accoppiamento fra l'elettrodo in tensione e quello a terra, senza determinare situazioni critiche per la sollecitazione elettrica.

SOLUZIONE A

La prima ipotesi considerata è quella di mantenere lo stesso schermo utilizzato in fase di campionatura (h:22mm), ma di spostarlo verso la base dell'isolatore di 5mm. Il valore di capacità si riduce di circa 1pF, quindi è una soluzione inefficace se si vuole rientrare nel target richiesto.



C*=18.05 pF	U= 0.0052 J
	V=24 kV
C**=17.82 pF	Q=0.4278 μ C
	V=24 kV

Tab. 5.14 valore di capacità ottenuto dalla sola variazione della posizione dello schermo

L'isolatore in esercizio si troverà ad operare con tensioni corrispondenti alla classe 12kV, ma si preferisce collaudarlo ed omologarlo in classe 24kV in modo che sia già pronto per possibili future implementazioni di questo innovativo di IMS da palo. I valori efficaci delle tensioni di

prova per la classe 24kV sono 50 kV per la prova a frequenza industriale e 125kV per la prova ad impulso. In tutti i plot seguenti le aree colorate corrispondono a:

- zone in cui lo stress elettrico supera i 7kV/mm con tensione di prova a frequenza industriale (50kV r.m.s.)
- zone in cui lo stress elettrico supera i 10kV/mm con tensione di prova ad impulso (125kV picco)

La sollecitazione elettrica nella configurazione senza ampolla sarebbe accettabile sia alla tensione di prova a frequenza industriale che a quella ad impulso. (Fig.5.50)

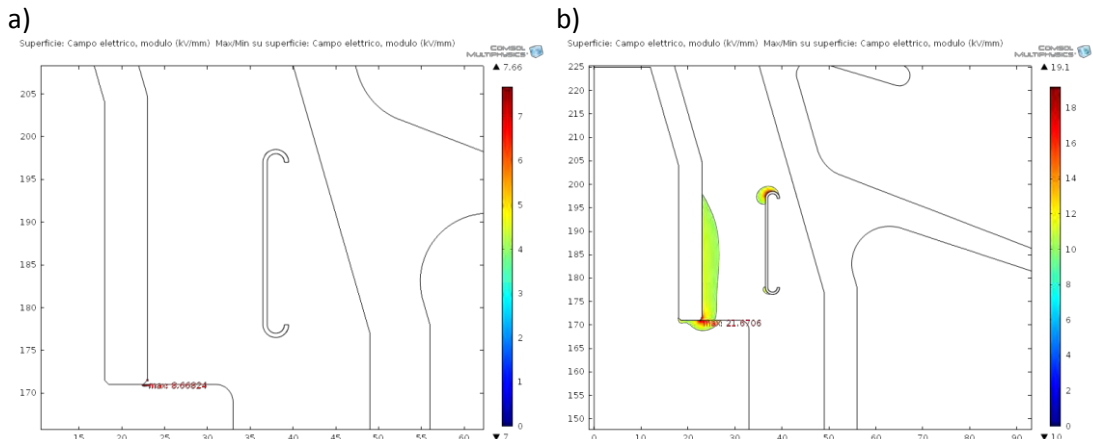


Fig. 5.50 stress elettrico soluzione A: a) 50kV f.i. ; b) 125kV impulso

Se invece considerassimo anche l'ampolla in vuoto con i relativi contorni in tensione, lo stress elettrico rientrerebbe nei limiti della resina epossidica con la tensione di prova a frequenza industriale, ma l'isolamento cederebbe con la tensione di prova ad impulso. (Fig.5.51)

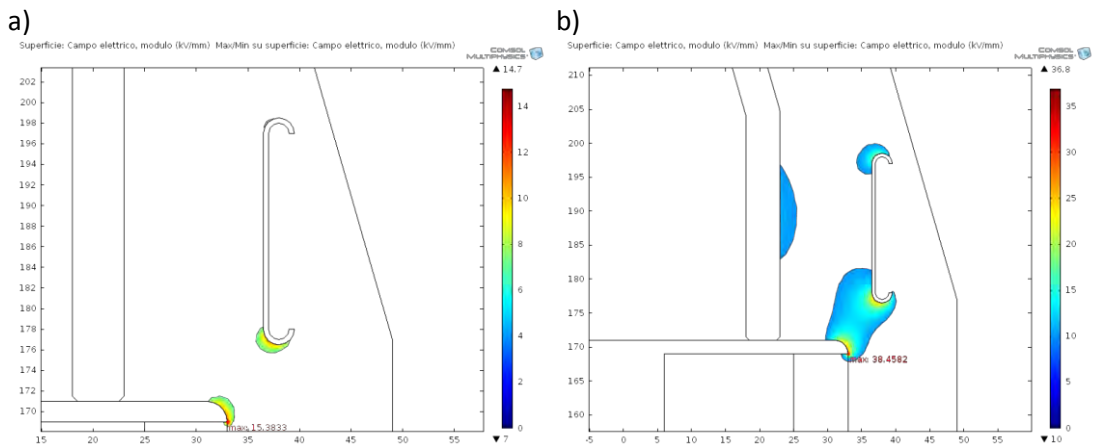
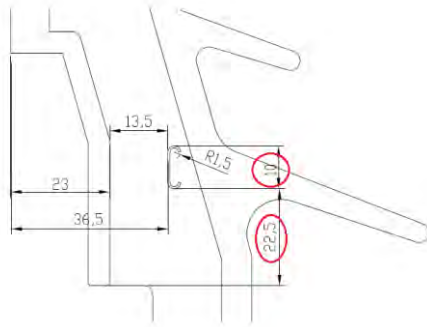


Fig. 5.51 stress elettrico soluzione A - config. con ampolla: a) 50kV f.i. ; b) 125kV a impulso

SOLUZIONE B

Si è ipotizzato allora di adottare uno schermo con altezza ridotta (h:10mm) posizionato con il vertice superiore come nella situazione originale. Con questa configurazione geometrica il valore di capacità sarebbe pari al limite superiore del range desiderato.



$C^*=15.00$ pF	$U=0.0043$ J
	$V=24$ kV
$C^{**}=14.67$ pF	$Q=0.3521$ μ C
	$V=24$ kV

Tab. 5.15 valore di capacit  ottenuta dalla sola variazione della posizione dello schermo

La sollecitazione elettrica nella configurazione senza ampolla non risulta critica ne nella prova a frequenza industriale ne nella prova ad impulso.

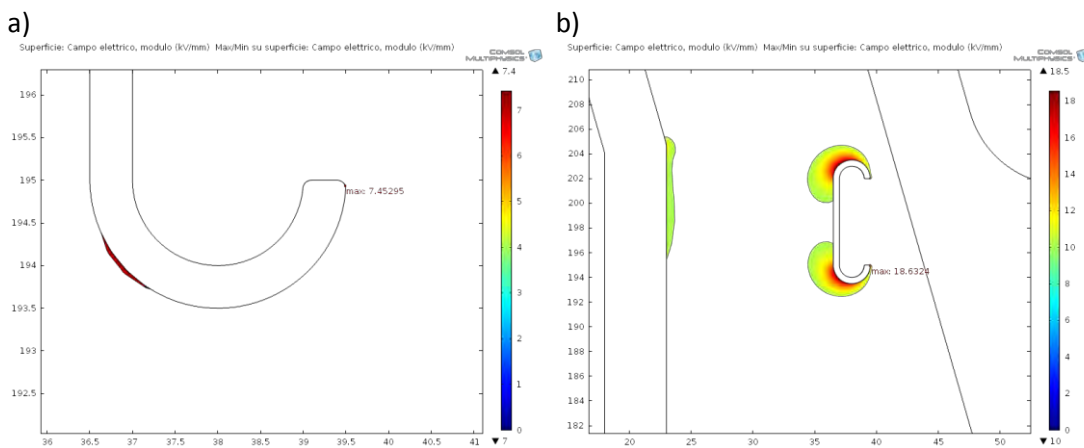


Fig. 5.52 stress elettrico soluzione B: a) 50kV f.i. ; b) 125kV impulso

Se consideriamo invece la presenza del dispositivo di interruzione e dei relativi contorni in tensione, lo stress elettrico nella zona critica aumenta, ma non in misura tale da risultare critico per la tenuta della resina epossidica.

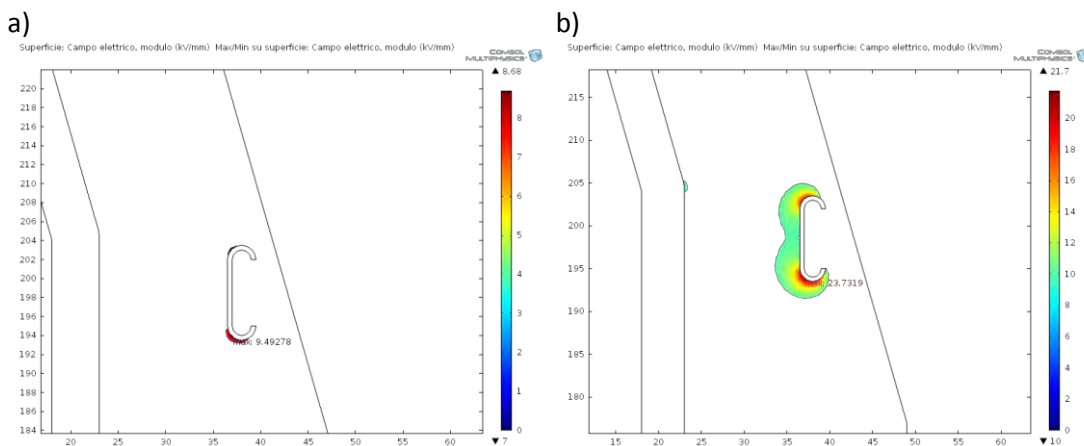


Fig. 5.53 stress elettrico soluzione B –config.con ampolla: a) 50kV f.i. ; b) 125kV impulso

Si pu  concludere quindi che con il posizionamento originale della presa capacitiva non si riesce a centrare l’obiettivo dei 5 ± 15 pF, ma lo si pu  fare riducendo a 10mm l’altezza dello schermo. Adottando questa soluzione non si mette in pericolo la tenuta dell’isolatore n  alla prova di tenuta a frequenza industriale ne alla prova ad impulso.

SOLUZIONE C

Se volessimo rientrare nel range $5 \div 15 \text{ pF}$ con un margine più ampio dovremmo diminuire ulteriormente l'altezza dello schermo. Se la posizione del vertice superiore dello schermo capacitivo resta invariata, la riduzione dell'altezza dell'armatura collegata a terra si riflette in una riduzione della sollecitazione elettrica.

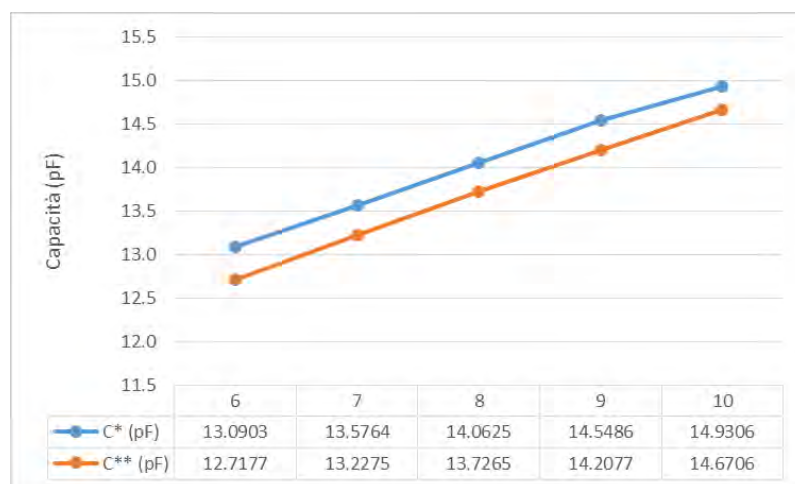


Fig. 5.54 andamento del valore di capacità in funzione dell'altezza dello schermo

La categoria di temperatura rappresenta il range termico in cui è garantito il funzionamento del condensatore. In questo caso il dielettrico è costituito dalla resina epossidica e le parti conduttrici sono realizzate in ottone e acciaio, per cui non c'è nessuna difficoltà nell'assicurare il corretto funzionamento della presa capacitiva a queste temperature: infatti il sistema epossidico mantiene abbastanza costante la resistenza al taglio, il coefficiente di espansione lineare e la costante dielettrica nell'intervallo $-50^{\circ}\text{C} / +80^{\circ}\text{C}$.

Ad ogni modo in un condensatore reale il valore capacitivo varia con la temperatura sia per le alterazioni delle proprietà del dielettrico che per i cambiamenti della struttura geometrica del componente e in generale tale dipendenza non è lineare. Il coefficiente di temperatura TC rappresenta lo scostamento in ppm ($1/10^6$) del valore della capacità reale rispetto a quello nominale per ogni grado centigrado di differenza rispetto ai 25°C .

Il TC si deriva dai risultati di una serie di misurazioni sul condensatore in prova a diverse temperature di esercizio: generalmente si determina per primo il valore di capacità a temperatura ambiente e si procede misurando i valori di capacità a intervalli di temperatura regolari, da quella minima a quella massima. Il circuito di prova, rappresentato in Fig.5.55, è contenuto in una camera climatica di cui si può controllare in modo preciso la temperatura interna.

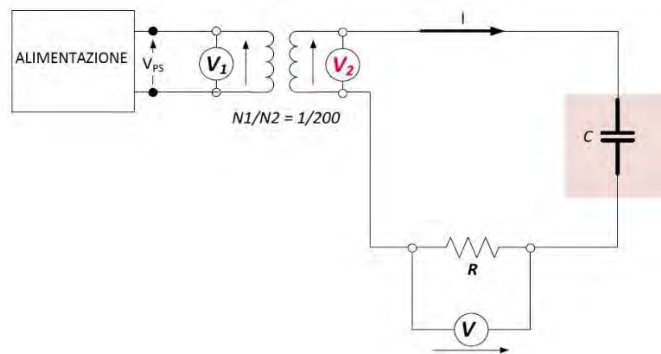


Fig. 5.55 circuito di prova per la misura del TC

Il valore di tensione letto dal voltmetro sulla resistenza di misura è proporzionale alla corrente in circolo nella maglia, la quale si può ritenere proporzionale al valore di capacità in quanto la resistenza è trascurabile rispetto alla reattanza capacitiva.

$$|\bar{I}| = \frac{|\bar{V}_2|}{|\bar{Z}|} = \frac{|\bar{V}_2|}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \cong \frac{|\bar{V}_2|}{X_c} = |\bar{V}_2| \cdot \omega \cdot C \rightarrow V = R \cdot I = \quad (5.26)$$

$$= R \cdot |\bar{V}_2| \cdot \omega \cdot C \rightarrow V \propto C$$

Il valore del coefficiente di temperatura si calcola quindi come:

$$TC = \frac{|V - V_{20^\circ C + 60min}|}{V_{20^\circ C + 60min}} \cdot \frac{1}{|T - T_{20^\circ C}|} \quad (5.27)$$

Le variazioni di tensione e quindi di capacità vengono solitamente espresse come percentuali rispetto al valore ottenuto a temperatura ambiente. È molto importante ridurre al minimo l'influenza delle capacità parassite del circuito di misura, eventualmente stimandole e sottraendole ai risultati delle misurazioni.

T [°C]	t [min]	V [mV]	rappV	ΔT _{amb}	ppm/°C
-40	0	116.1	-6.23%	60	1037.881
-40	30	115.62	-6.61%	60	1102.496
-40	60	115.6	-6.63%	60	1105.188
-20	0	119.36	-3.59%	40	898.5542
-20	30	118.17	-4.56%	40	1138.842
-20	60	117.99	-4.70%	40	1175.188
0	0	122.5	-1.06%	20	529.0364
0	30	120.96	-2.30%	20	1150.957
0	60	120.75	-2.47%	20	1235.764
20	0	124.82	0.82%	0	
20	30	124.05	0.19%	0	
20	60	123.81	0.00%	0	
40	0	130.4	5.32%	20	2661.336
40	30	127.82	3.24%	20	1619.417
40	60	127.34	2.85%	20	1425.571
60	0	134.4	8.55%	40	2138.357
60	30	132.07	6.67%	40	1667.878

60	60	131.48	6.19%	40	1548.744
80	0	131.28	6.03%	60	1005.573
80	30	136.07	9.90%	60	1650.378
80	60	137.34	10.93%	60	1821.339

Tab. 5.16 risultati della prova per la misura del TC

Per individuare il corretto valore del TC è fondamentale garantire che i valori di capacità vengano misurati quando l'oggetto in prova si trova in equilibrio termico con il sistema e che nella camera climatica non ci siano gradienti di temperatura: per questo i risultati si possono ritenere validi solo dopo una permanenza del campione alla temperatura desiderata superiore ai 60 minuti. Dalla Fig.5.56 si vede che le misure del coefficiente di temperatura eseguite quando il campione non è ancora termalizzato (0min; 30min) non sono attendibili.

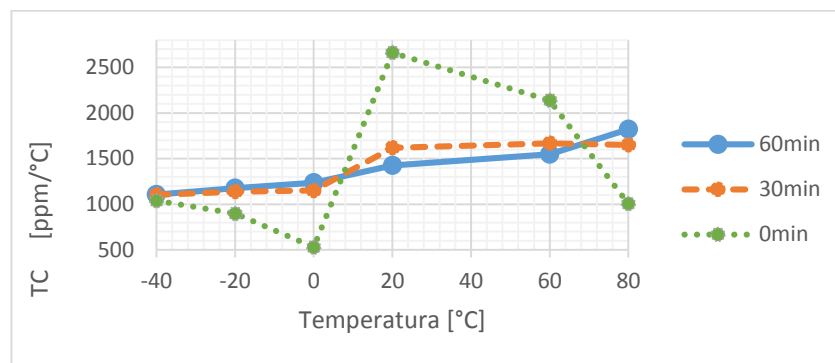


Fig. 5.56 variazione del TC al variare del salto termico

Generalmente i materiali che hanno costante dielettrica relativa più elevata hanno un comportamento poco stabile al variare della temperatura: questo è esattamente ciò che accade alla resina epossidica, perciò non è possibile soddisfare il requisito sul coefficiente di temperatura con una semplice presa capacitiva. Se per la strumentazione che si deve collegare a valle il valore di 150ppm/°C è inderogabile, si dovrà ricorrere a una soluzione che preveda l'utilizzo di condensatori ceramici.

Nel nostro caso abbiamo C_{nom} di 9.8pF, un TC da rispettare di 150ppm/°C, con una T_{max} di 80°C e una T_{min} di -50°C.

Lo scostamento dal valore di capacità nominale a T_{max} è dato da:

$$\Delta C^* = \frac{C_{nom} \cdot TC \cdot \Delta T}{10^6} = \frac{9.8 \cdot 10^{-12} \cdot 150 \cdot (|80 - 25|)}{10^6} = 0.08 \text{ pF} \rightarrow 0.81\%$$

Lo scostamento dal valore di capacità nominale a T_{min} è dato da:

$$\Delta C^{**} = \frac{C_{nom} \cdot TC \cdot \Delta T}{10^6} = \frac{9.8 \cdot 10^{-12} \cdot 150 \cdot (|-50 - 25|)}{10^6} = 0.11 \text{ pF} \rightarrow 1.12\%$$

5.4.2. Intensità della Sollecitazione Elettrica

L'obiettivo delle simulazioni di campo elettrico su questo isolatore è quello di verificare se l'inserimento della presa capacitiva inglobata nel nucleo in resina possa determinare dei cedimenti elettrici durante la prova di tenuta a frequenza industriale e/o a impulso atmosferico.

L'isolatore THO è destinato ad operare in esercizio in classe 12kV, ma si valuta la possibilità di omologarlo a 24kV ed eventualmente di testarne i limiti a 36kV. Nella Tab.5.17 sono indicati i valori efficaci di prova previsti dalla normativa.

U_{nom} (concatenata) [kV]	Tenuta a freq.industriale [kV]	Tenuta a imp.atmosferico [kV]
12	28	75
24	50	125
36	70	170

Tab. 5.17 tensioni di prova

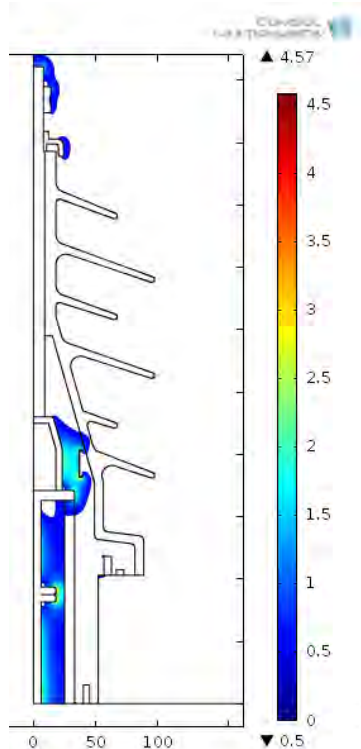
Il profilo della parte in gomma di questo isolatore ha una linea di fuga di 960mm. Dato che il diametro massimo dell'isolatore è di 177mm, il fattore di correzione K_D è unitario (vedasi Eq.5.1). Come si vede dai dati riportati in Tab.5.18, la geometria scelta per la parte alettata è idonea all'esercizio in ogni condizione d'inquinamento per le classi 12kV e 24kV; per la classe 36kV invece non viene rispettato il valore minimo richiesto dalle applicazioni con contaminazione molto pesante.

	leggero	medio	pesante	molto pesante
12 kV	192	240	300	372
24 kV	384	480	600	744
36 kV	576	720	900	1116

Tab. 5.18 linea di fuga minima a diverse condizioni di inquinamento

Nella Fig.5.57a sono evidenziate le zone in cui il gradiente elettrico supera 0.5kV/mm; mentre la Fig.5.57b riporta l'andamento delle linee di potenziale. I risultati si riferiscono ad una tensione applicata di 24kV.

a)



b)

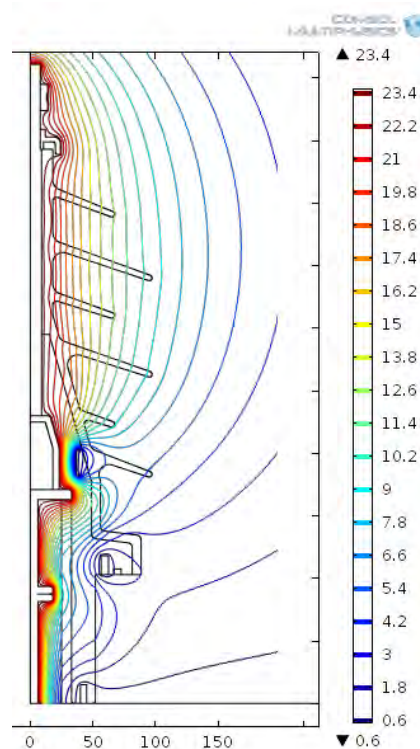


Fig. 5.57 plot di simulazione: a) gradiente elettrico superiore a 0.5kV/mm , b) isolinee del potenziale

La stress elettrico interessa in maniera particolare sia l'interno dell'ampolla in vuoto che il dielettrico interposto fra il conduttore in tensione e lo schermo di terra. Dato che le criticità del meccanismo di interruzione non sono oggetto di quest'analisi, si procede con la valutazione della sollecitazione a cui è sottoposta la resina che funge da dielettrico per la presa capacitiva.

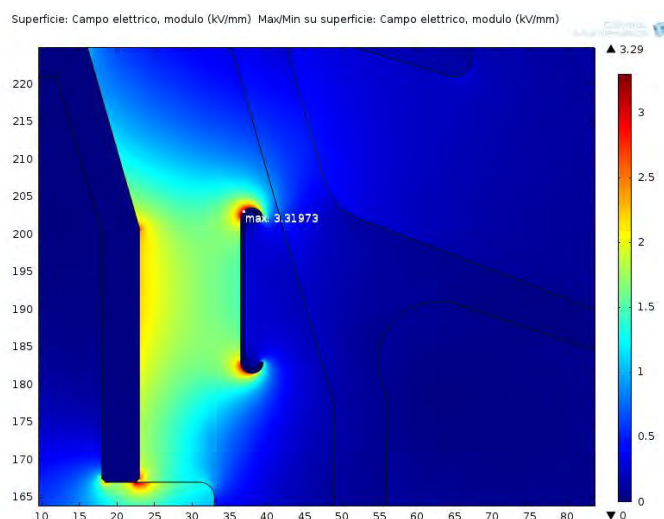


Fig. 5.58 gradiente elettrico sulla presa capacitiva a 24kV

Dato che il valore di tensione che innesca la scarica è il valore massimo e non quello efficace, il potenziale assegnato ai contorni dei conduttori attivi deve essere pari a $\sqrt{2} \cdot V_{eff}$.

In Tab.5.19 vengono riportati i valori massimi del campo elettrico riscontrati sulla presa capacitiva, per ogni possibile tensione di prova.

	Nominale	Freq. Industriale	Imp. Atmosferico
Classe 12kV	2.405 kV/mm	5.612 kV/mm	9.992 kV/mm
Classe 24kV	4.810 kV/mm	10.022 kV/mm	17.714 kV/mm
Classe 36kV	7.215 kV/mm	14.021 kV/mm	24.096 kV/mm

Tab. 5.19 risultati delle simulazioni

Considerando cautelativamente un limite di 7kV/mm per la tensione nominale e la prova a frequenza industriale e un limite di 10kV/mm per la prova ad impulso, si evince che il posizionamento ipotizzato per la presa capacitiva determina uno stress elettrico che non pregiudica il superamento delle prove dielettriche previste per la classe 12kV.

Qualche criticità potrebbe emergere in classe 24kV sia per quanto riguarda la prova a frequenza industriale che per la prova ad impulso.

In Fig.5.59 si evidenzia che a $\sqrt{2} \cdot 50$ kV la zona in cui lo stress elettrico supera i 7 kV/mm è talmente limitata da non pregiudicare l'esito positivo della prova a frequenza industriale.

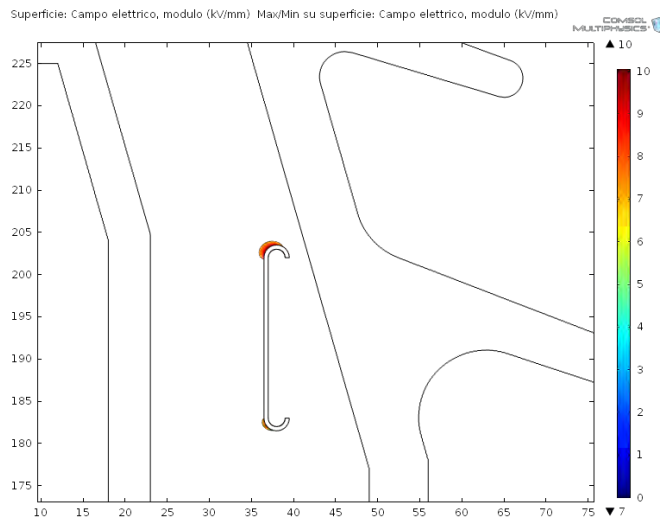


Fig. 5.59 zone in cui lo stress elettrico supera i 7kV/mm - 50kV f.i. per la classe 24kV

Questo è confermato dagli esiti della prova stessa: fra i 35 pezzi prodotti nessuno ha fallito questo tipo di collaudo (vedasi Appendice B). Alle scariche parziali c'è stato l'11.43% di scarto (4/35 nok): una percentuale piuttosto contenuta se si pensa che è riferita ad una campionatura e quindi ad un processo di stampaggio ancora non completamente ottimizzato. Questi scarti possono essere stati determinati da un impreciso posizionamento degli elementi interni allo stampo oppure ad un non completo riscaldamento delle parti mobili.

In Fig.5.60 si evidenzia invece che anche a 125 kV la zona in cui lo stress elettrico supera i 10kV/mm è molto limitata: l'estensione della zona critica verso il "bicchiere" in tensione non desta preoccupazioni in quanto in quella porzione di dielettrico il campo è abbastanza uniforme quindi la rigidità della resina sarà ragionevolmente superiore al limite cautelativamente prefissato.

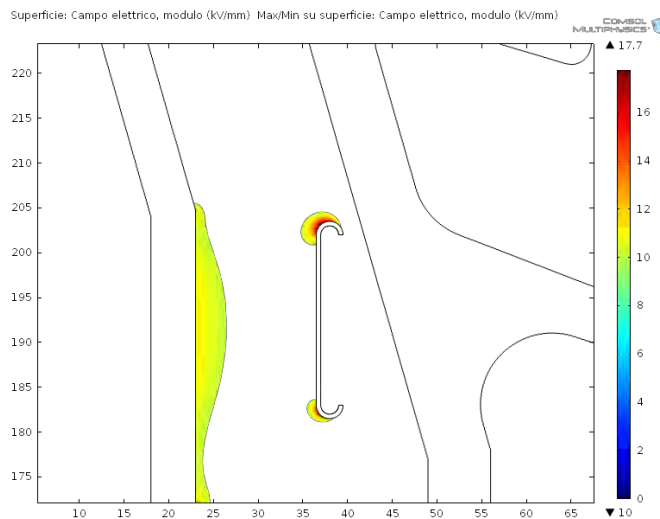


Fig. 5.60 zone in cui lo stress elettrico supera i 10kV/mm – 125kV a impulso per la classe 24kV

Per valutare la possibilità che si verifichi una scarica in aria si è considerato anche l'andamento della sollecitazione elettrica lungo l'interfaccia fra l'alettatura in gomma e l'aria ambiente. Come si può vedere dalla Fig.5.61 il valore massimo del modulo della sollecitazione

elettrica supera i 22kV/cm per un tratto insufficiente perché prevalga il fenomeno di ionizzazione su quello dell'attaccamento e si sviluppi una scarica in aria.

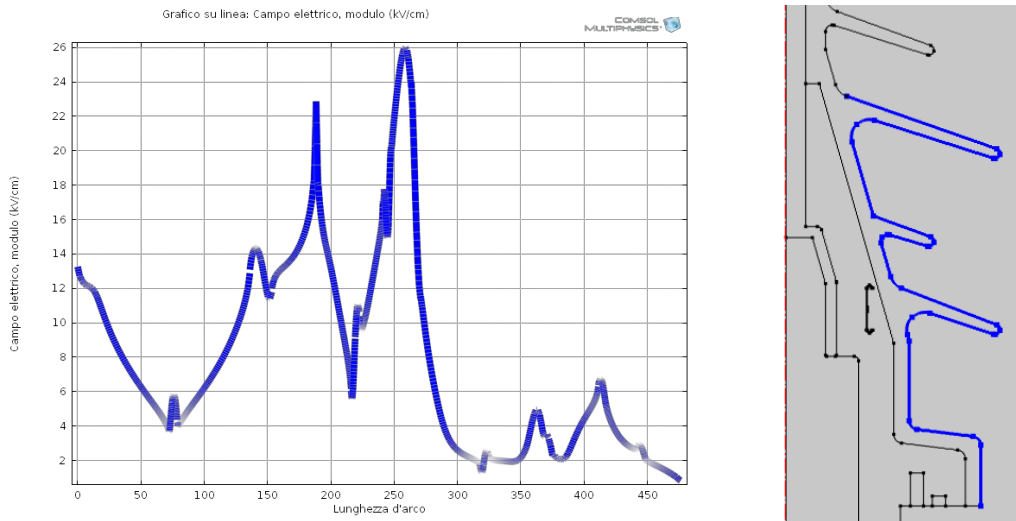


Fig. 5.61 valutazione dello stress elettrico nell'interfaccia fra gomma siliconica e aria ambiente

La tenuta dell'isolatore alla tensione impulsiva 1.2/50 μ s con picco $U_p=125$ kV è stata confermata sperimentalmente.

Per la generazione della forma d'onda impulsiva è stato utilizzato il generatore di Marx presente nel laboratorio di Alte Tensioni dell'Università di Padova, di cui la Fig.5.62 mostra il circuito equivalente ad uno stadio.

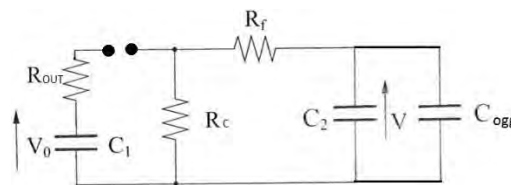


Fig. 5.62 circuito equivalente ad uno stadio del generatore di Marx

R_C	350 Ω (*)
R_f	150 Ω
C_2	2 nF
C_1	0.21 μ F (*)
R_{OUT}	50 Ω

Tab. 5.20 parametri del circuito di Marx: i valori contrassegnati con (*) dipendono dal numero degli stadi inseriti

Le condizioni ambientali della prova sono riassunte in Tab.5.21. Se ne deve tenere conto per quantificare correttamente le caratteristiche dielettriche dell'aria.

Temperatura	18.3°C
Pressione	1017mbar
Umidità relativa	35.1%

Tab. 5.21 condizioni ambientali di prova.

L'isolatore si fissa ad un'apposita flangia corredata di o-ring, questa viene montata su un'ideale apparecchiatura di prova, costituita da una camera a tenuta. La prima operazione

è quella di forzare il vuoto all'interno della camera con un'apposita pompa, per procedere poi al riempimento con SF₆ alla pressione desiderata.

Per ottenere la forma d'onda dell'impulso normalizzato di fulminazione, indicata come 1.2/50 μs, le costanti di tempo dell'Eq.5.24 devono essere τ₁ = 0.4 μs per il fronte e τ₂ = 70 μs per la coda.

$$v(t) = k V_{max} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (5.28)$$

Scegliamo di inserire n=2 stadi ottenendo C₁=0.21/n=0.105μF e R_c=350·n=700Ω. Con questi parametri le costanti di tempo valgono rispettivamente:

$$\tau_1 = (R_f + R_{OUT}) \cdot C_2 \rightarrow 0.4 \mu s \quad (5.29)$$

$$\tau_2 = (R_c + R_{OUT}) \cdot C_1 \rightarrow 89 \mu s \quad (5.30)$$

Il tempo di salita rilevato è pari a T₁=1.10 μs e rientra nella tolleranza del ±30% prevista dalla normativa (min. 0.84μs, max. 1.56μs). Il tempo all'emivalore riscontrato è invece pari a T₂=54,4μs ed anch'esso rientra nel range ±20% previsto dalla normativa (min. 40μs, max. 60μs).

La tensione V₀ è stata impostata a 70kV sul singolo stadio quindi a 70·n=140kV totali.

La tensione V_p presente sull'oggetto in prova sarà minore di V₀ per effetto del rendimento del castello, valutabile in prima approssimazione con l'Eq.5.31 ma ridotto ulteriormente dalla presenza delle resistenze di coda:

$$\eta = \frac{V}{V_0} = \frac{C_1}{C_1 + (C_2 + C_{ogg})} \rightarrow 0.98 \quad (5.31)$$

La normativa prevede una tolleranza sul V_p del $\pm 3\%$ (min.121.25kV, max.128.75kV)

In Tab.5.22 vengono riportati i valori di picco dei 15 impulsi di polarità negativa e dei 15 impulsi di polarità positiva a cui è stato sottoposto l'isolatore in prova. Non si sono manifestati fenomeni di scarica per nessuna delle applicazioni della tensione impulsiva.

La normativa comunque prevede che l'isolatore superi la prova se:

- Non si verifica alcuna perforazione per entrambe le polarità,
- Il numero delle scariche superficiali in aria non sia più di due per ogni serie di 15 impulsi.



Impulso	Pol. negativa	Pol. positiva
1	126 kV	124,7 kV
2	126 kV	125,6 kV
3	126 kV	125,7 kV
4	125,8 kV	125,8 kV
5	125,8 kV	125,7 kV
6	126 kV	125,9 kV
7	125,7 kV	125,7 kV
8	125,7 kV	125,8 kV
9	125,6 kV	125,6 kV
10	125,9 kV	125,5 kV
11	125,2 kV	125,8 kV
12	125,5 kV	125,6 kV
13	125 kV	125,7 kV
14	125,6 kV	125,3 kV
15	125,5 kV	125,4 kV

Tab. 5.22 applicazione degli impulsi di prova

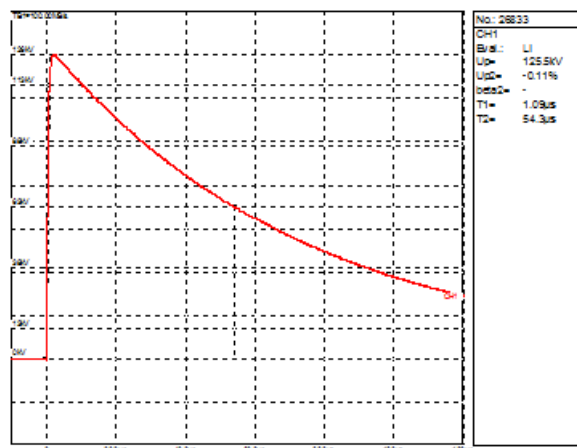


Fig. 5.63 oscillogramma della prova ad impulso con V_p a 125kV con esito positivo

I collaudi previsti dalla classe 36kV risultano ovviamente essere più critici rispetto a quelli della classe 24kV. Sia con la tensione di prova alla frequenza industriale che con quella di tenuta ad impulso si supera lo stress elettrico critico in tutta la zona fra il conduttore a potenziale non nullo e lo schermo di terra.

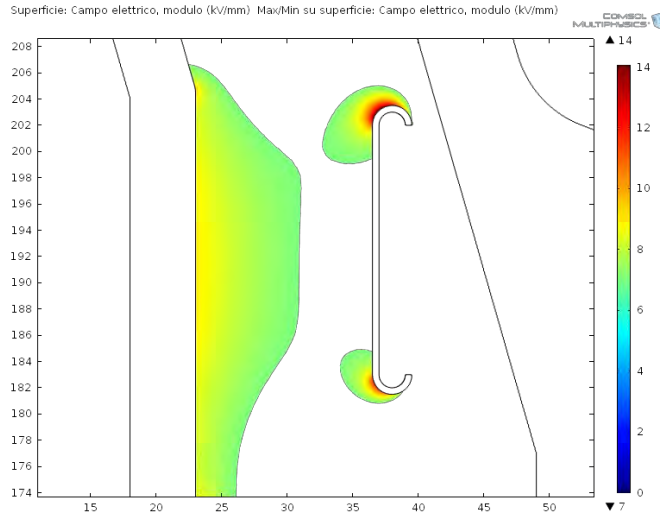


Fig. 5.64 zone in cui lo stress elettrico supera i 7kV/mm - 70kV f.i. per la classe 36kV

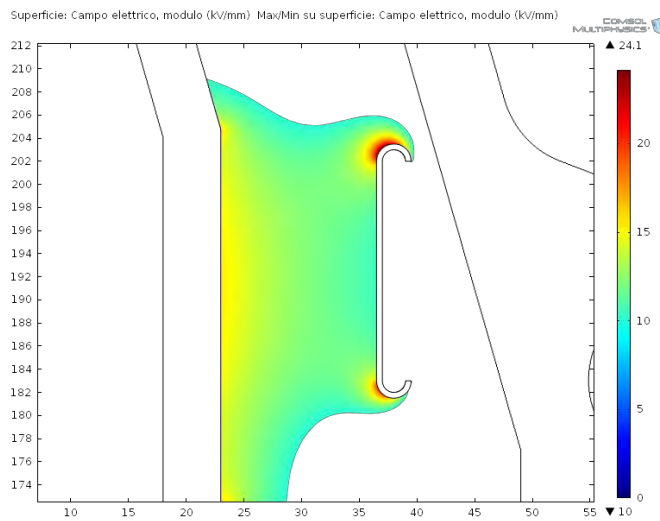


Fig. 5.65 zone in cui lo stress elettrico supera i 10kV/mm - 170kV a impulso per la classe 36kV

Per validare i risultati della simulazione e dimostrare così che l'isolatore in questione non potrebbe essere omologato per la classe 36kV, esso è stato sottoposto alla prova ad impulso con tensione di picco di 170kV.

Rispetto alla prova precedente si sono inseriti n=4 stadi del generatore di Marx ottenendo $C_1=52.5\text{nF}$ e $R_c=1400\Omega$: le costanti di tempo di conseguenza sono pari a $\tau_1=0.3\mu\text{s}$ e $\tau_2=76\mu\text{s}$.

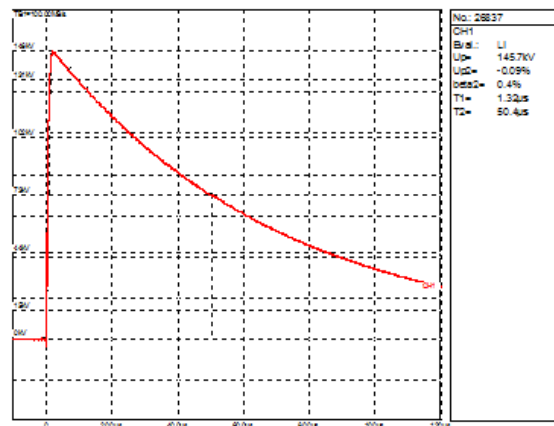
Il tempo di salita rilevato è pari a $T_1=1.31\mu\text{s}$ e rientra nella tolleranza del $\pm 30\%$ prevista dalla normativa (min $0.84\mu\text{s}$, max $1.56\mu\text{s}$). Il tempo all'emivalore riscontrato è invece pari a $T_2=50.7\mu\text{s}$ ed anch'esso rientra nel range $\pm 20\%$ previsto dalla normativa (min. $40\mu\text{s}$, max. $60\mu\text{s}$).

La tensione V_0 è stata impostata inizialmente a 40kV sul singolo stadio quindi a $40 \cdot n=160\text{kV}$ totali che, tenendo conto del rendimento del castello, si riflettono in $V_p \approx 145\text{kV}$ sull'oggetto

in prova. L'isolatore in prova non ha manifestato scariche per i primi 3 impulsi applicati con polarità negativa.

Impulso	Pol. negativa	Esito
1	145 kV	Ok
2	145.8 kV	Ok
3	145.7 kV	Ok

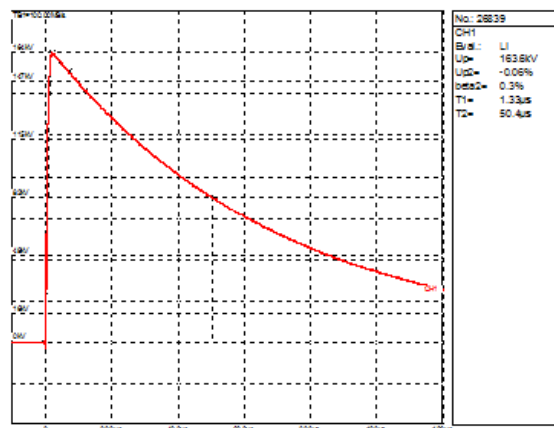
Tab. 5.23 primo ciclo di impulsi applicati sull'oggetto in prova



A questo punto la tensione sul singolo stadio è stata aumentata a 45kV quindi a $45 \cdot n = 180\text{kV}$ totali che, tenendo conto del rendimento del castello, si riflettono in $V_p \approx 163\text{kV}$ sull'oggetto in prova. L'isolatore in prova non ha manifestato scariche per i primi 3 impulsi applicati con polarità negativa.

Impulso	Pol. negativa	Esito
1	163 kV	Ok
2	163.6 kV	Ok
3	163.4 kV	Ok

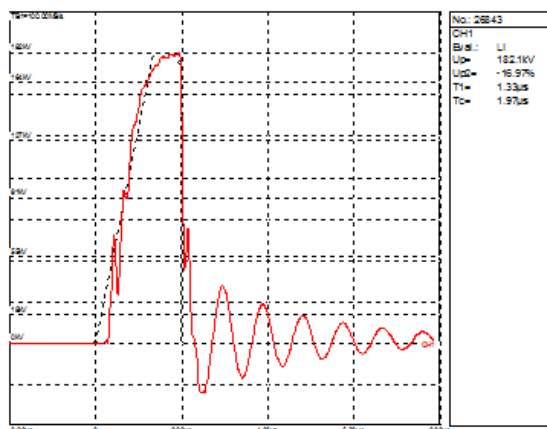
Tab. 5.24 secondo ciclo di impulsi applicati sull'oggetto in prova



La tensione sul singolo stadio è stata ulteriormente aumentata a 50kV quindi a $50 \cdot n = 200\text{kV}$ totali che, tenendo conto del rendimento del castello, si riflettono in $V_p \approx 180\text{kV}$ sull'oggetto in prova. L'isolatore in prova ha manifestato 2 scariche sui 3 impulsi applicati con polarità negativa.

Impulso	Pol. negativa	Esito
1	181.8 kV	Ok
2	181.7 kV	Nok
3	181.3 kV	Nok

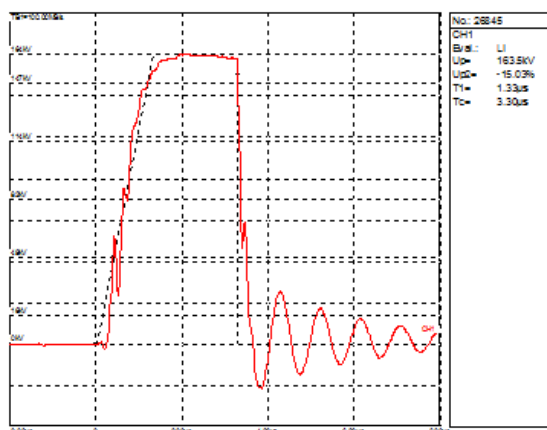
Tab. 5.25 terzo ciclo di impulsi applicati sull'oggetto in prova



Tali scariche non si sviluppano in aria, ma presumibilmente si verificano nel corpo dell'isolatore: per confermarlo scendiamo di nuovo con la tensione del singolo stadio ritornando a 45kV ovvero a $45 \cdot n = 180\text{kV}$ totali. L'isolatore scarica per tutti e tre gli impulsi di polarità negativa applicati.

Impulso	Pol. negativa	Esito
1	163.1 kV	Nok
2	163.4 kV	Nok
3	163.3 kV	Nok

Tab. 5.26 quarto ciclo di impulsi applicati sull'oggetto in prova



Si può concludere che l'isolatore scarica internamente per tensioni impulsive applicate che abbiano un picco compatibile con quello previsto dalla normativa per la classe 36kV, come era stato previsto alla luce dei risultati della simulazione agli elementi finiti.

5.5. TRAVERSEÉ CON TA

L'isolatore passante rappresentato in Fig.5.66 viene utilizzato come interfaccia di ingresso/uscita dei conduttori in tensione per apparecchiature isolate in SF₆. È destinato a lavorare in ambienti esterni perciò deve essere realizzato in resina cicloalifatica: viste le ridotte dimensioni in gioco (L≈230mm) realizzarlo come composito, ossia formato da un nucleo in resina su cui si sovrastampa il profilo in gomma siliconica, comporterebbe dei costi troppo elevati.

All'interno del corpo in resina vengono inglobati un trasformatore amperometrico per la misura della corrente e una presa capacitiva per il rilevamento di presenza tensione (Fig.5.67 e Fig.5.68).

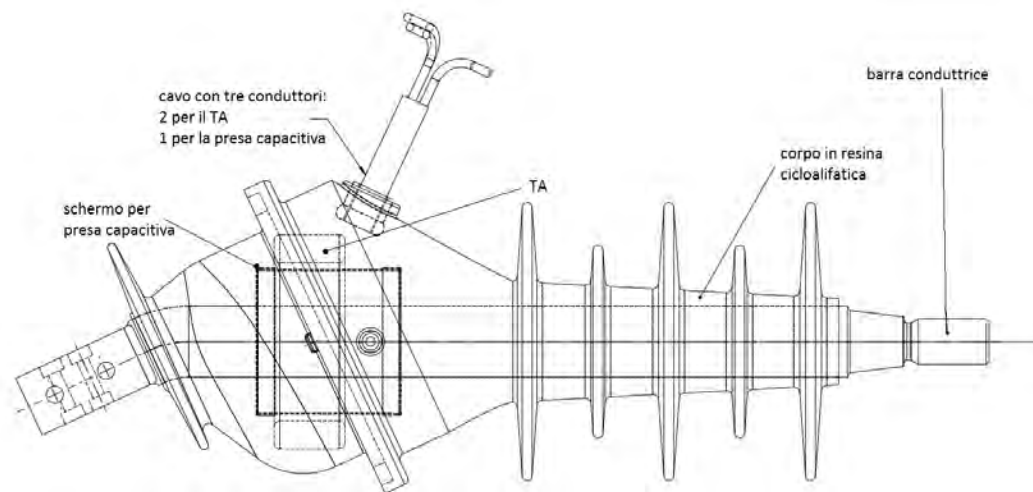


Fig. 5.66 sezione del traverseé

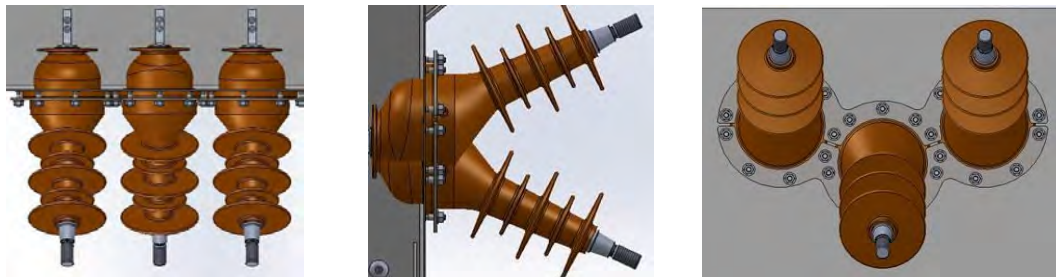


Fig. 5.67 montaggio del traverseé sulla carpenteria che confina l'ambiente in SF₆

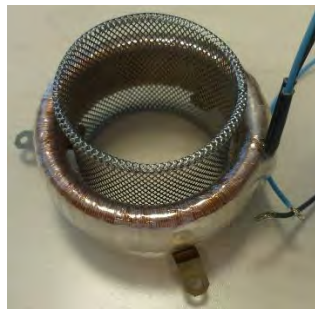


Fig. 5.68 posizionamento reciproco dello schermo e del TA

Gli obiettivi di questo ciclo di simulazioni sono:

- individuare eventuali criticità nel posizionamento del sistema schermo+TA,
- valutare l'entità della capacità fra le parti in tensione e le parti a terra,
- stabilire se c'è pericolo di perforazione del dielettrico alla prova a frequenza industriale e soprattutto alla prova ad impulso.

La geometria dell'isolatore non è assialsimmetrica, perciò la simulazione in ambiente COMSOL® deve partire dall'importazione di una geometria 3D. (Fig.5.69)

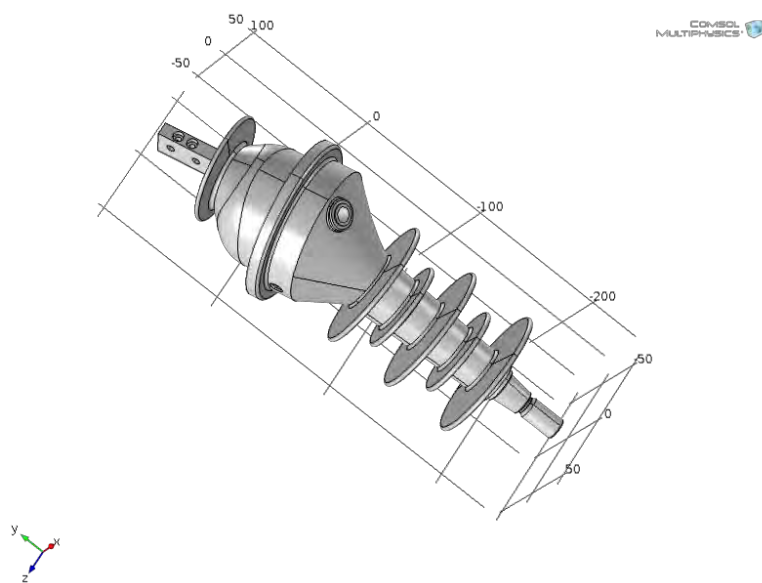


Fig. 5.69 geometria tridimensionale importata da ambiente CAD

L'assegnazione dei materiali è riportata in Fig.5.70.

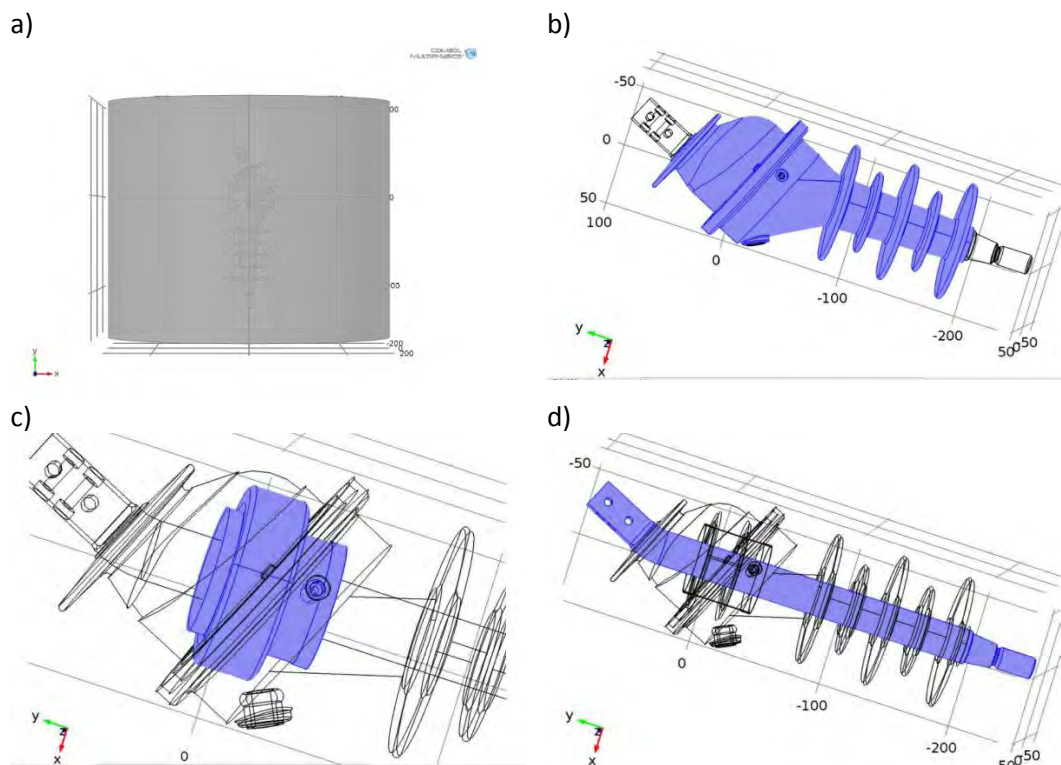


Fig. 5.70 assegnazione dei materiali: a) aria, b) resina epossidica, c+d) conduttore

Materiale	ϵ_r
Resina Epossidica	4
Aria	1

Tab. 5.27 costanti dielettriche dei materiali assegnati al componente

In Fig.5.71a vengono evidenziati i contorni vincolati al potenziale di terra, mentre in Fig.5.71b sono rappresentati i contorni in tensione.

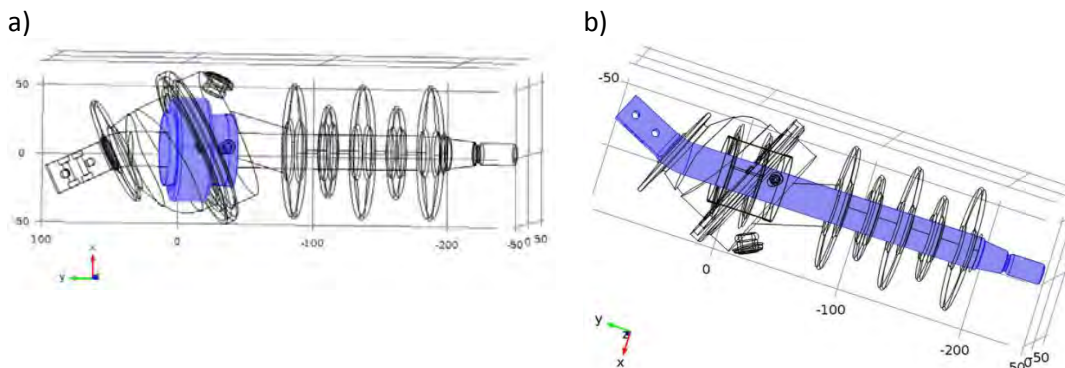


Fig. 5.71 condizioni al contorno: a) terra, b) potenziale non nullo

5.5.1. Accoppiamento Capacitivo

La capacità offerta dal posizionamento dello schermo è stata valutata tramite l'Eq.5.32 e l'Eq.5.33.

$$C^* = \frac{2 \cdot U}{V^2} \quad (5.32)$$

$$C^{**} = \frac{Q}{V} \quad (5.33)$$

Dove la tensione V è imposta, il valore di Q viene calcolato come il flusso del vettore spostamento elettrico \mathbf{D} sulla superficie chiusa dello schermo+TA (Fig.5.72a) e il valore di U viene ricavato dall'integrazione della densità di energia elettrica sul volume di resina (Fig.5.72b).

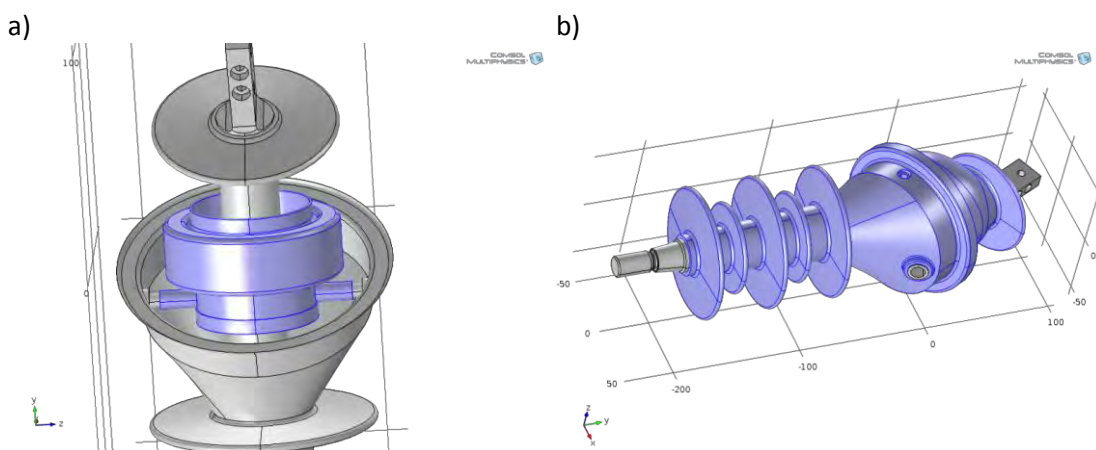


Fig. 5.72 domini di integrazione per il calcolo della capacità: a) integrazione superficiale di \mathbf{D} , b) integrazione volumetrica di U

$C^*=26.69$ pF	$U= 0.1334$ J
	$V=100$ kV
$C^{**}=26.52$ pF	$Q=2.6518$ μ C
	$V=100$ kV

Tab. 5.28 stima della capacità dal post-processing della simulazione

Il valore di capacità misurato sui campioni prodotti è riportato in Appendice C insieme ai risultati del collaudo elettrico. La media delle differenze fra la capacità misurata e quella valutata con l'energia totale è pari a 0.98pF; mentre quella con la carica sulla superficie dello schermo è di 1.15pF. In analogia con i casi progettuali esaminati in precedenza anche qui si riscontra una buona corrispondenza fra i risultati di simulazione e i rilievi sperimentali.

5.5.2. Valutazione dello Stress Elettrico

Impostiamo come potenziale di simulazione $\sqrt{2} \cdot 28\text{kV}$ che è la tensione di prova a frequenza industriale per isolatori di classe 12kV come quello che stiamo considerando.

Dato che la geometria non è assialsimmetrica si è deciso di valutare la sollecitazione elettrica interna alla resina sia sul 3D completo che su due sezioni longitudinali e perpendicolari fra loro.

a) piano yz – sezione A

b) piano xy – sezione B

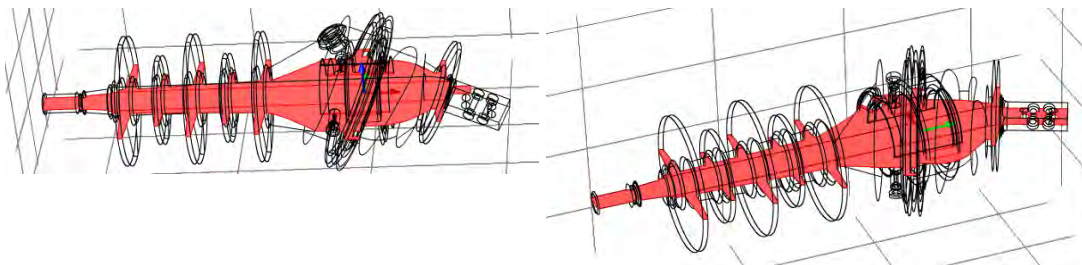


Fig. 5.73 sezioni di valutazione della sollecitazione elettrica

In Fig.5.74a è rappresentata la distribuzione 3D della sollecitazione elettrica: nella Fig.5.74b si evidenzia che la zona maggiormente stressata è quella ai bordi dello schermo di terra.

a)

b)

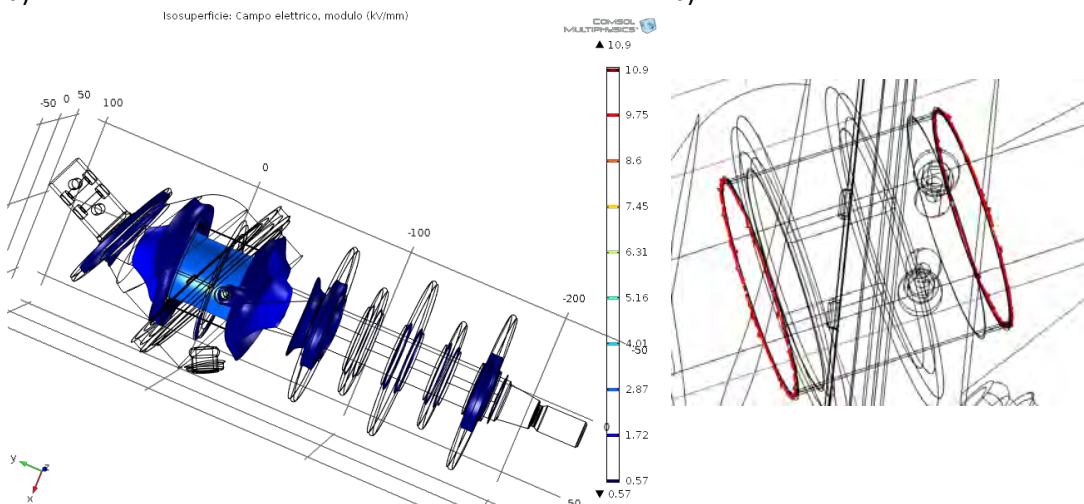
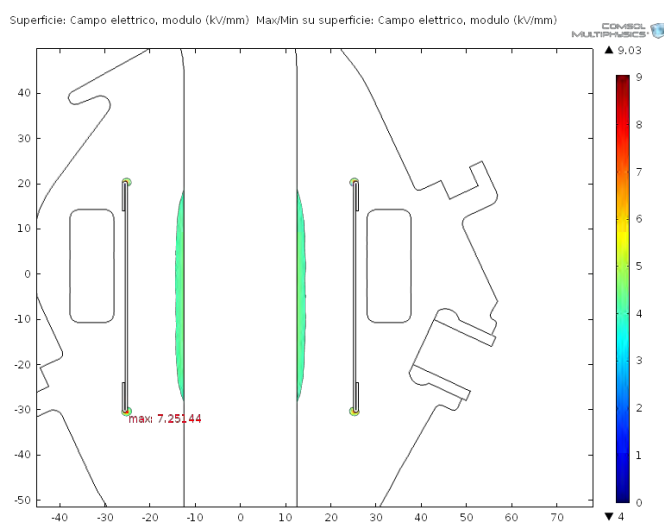
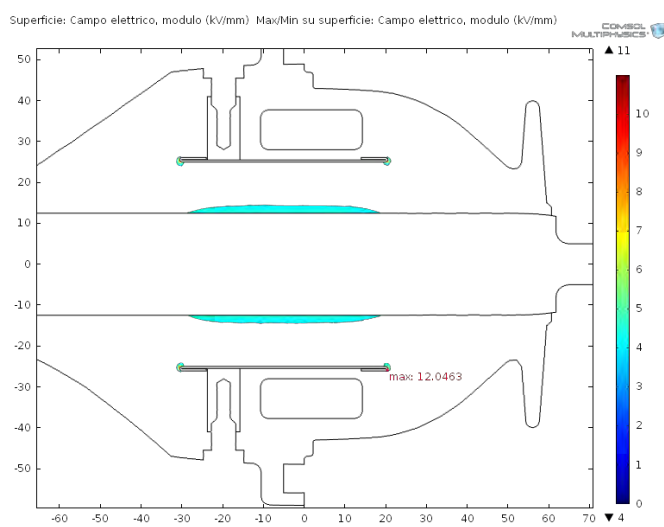


Fig. 5.74 distribuzione del campo elettrico a 28kV f.i.

In Fig.5.75 è rappresentato lo stress elettrico sulla sezione A (più critica), mentre la Fig.5.75 è relativa allo stress elettrico sulla sezione B (meno critica).



Come si può vedere dal plottaggio dei risultati, non ci sono situazioni critiche che possano determinare la perforazione sistematica dell'isolatore durante la prova a frequenza industriale (ovvero zone fra il conduttore in tensione e lo schermo a terra in cui il gradiente del campo elettrico superi continuamente i 7kV/mm). Ciò è confermato dall'esito dei collaudi elettrici riportato in Appendice C: le prime due matricole della produzione hanno scaricato durante la prova a 28kV per 1 minuto probabilmente per un errato posizionamento dell'assieme schermo+TA all'interno dello stampo. In Fig.5.77 si vede chiaramente il manifestarsi della scarica interna.



Fig. 5.77 criticità nel posizionamento dello schermo+TA all'interno dello stampo

Si desidera valutare ora lo stress elettrico a cui è sottoposto il corpo in resina quando viene sottoposto alla tensione impulsiva con picco di 70kV. La distribuzione della sollecitazione elettrica sul profilo 3D sarà la stessa già riscontrata con il potenziale ridotto: in questo caso ci interessa valutare la presenza di zone comprese fra lo schermo a terra e il conduttore in tensione in cui il gradiente limite di 10kV/mm venga "continuamente" superato.

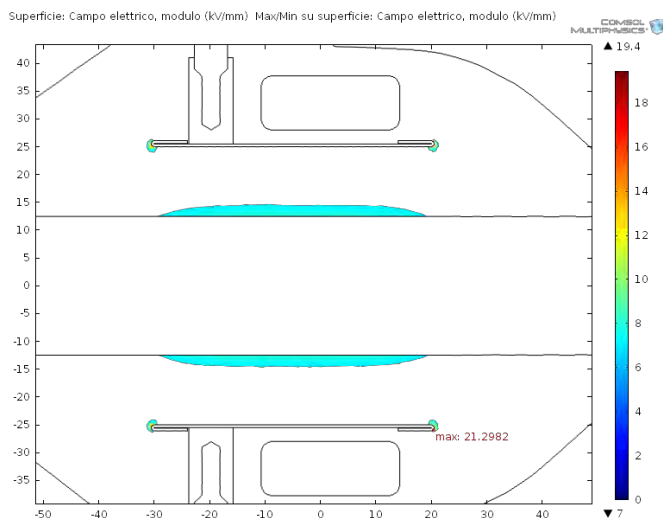


Fig. 5.78 stress elettrico sulla sezione A a 70kV

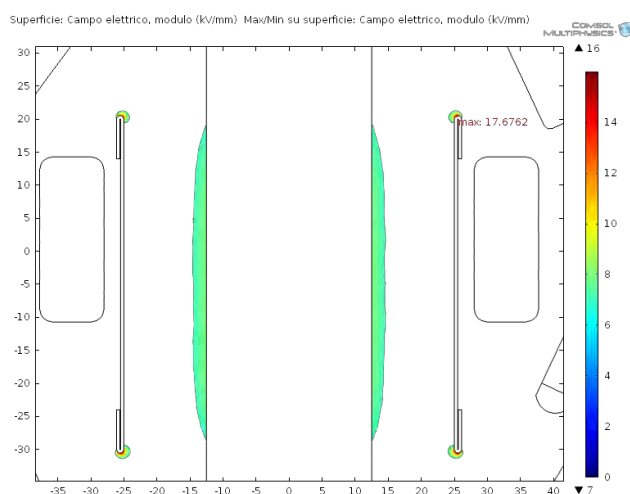


Fig. 5.79 stress elettrico sulla sezione B a 70kV

Da quanto riportato in Fig.5.78 e Fig.5.79 non emergono situazioni critiche per la perforazione dell'isolatore con la prova ad impulso. Per validare questa previsione si è sottoposto un campione alla prova ad impulso presso il laboratorio di Alte Tensioni dell'Università di Padova.

Si sono inseriti $n=4$ stadi del generatore di Marx ottenendo $C_1=52.5\text{nF}$ e $R_c=1400\Omega$: le costanti di tempo di conseguenza sono pari a $\tau_1=0.3\mu\text{s}$ e $\tau_2=76\mu\text{s}$.

Il tempo di salita rilevato è pari a $T_1=1.30\mu\text{s}$ e rientra nella tolleranza del $\pm 30\%$ prevista dalla normativa (min $0.84\mu\text{s}$, max $1.56\mu\text{s}$). Il tempo all'emivalore riscontrato è invece pari a $T_2=50.1\mu\text{s}$ ed anch'esso rientra nel range $\pm 20\%$ previsto dalla normativa (min. $40\mu\text{s}$, max. $60\mu\text{s}$).

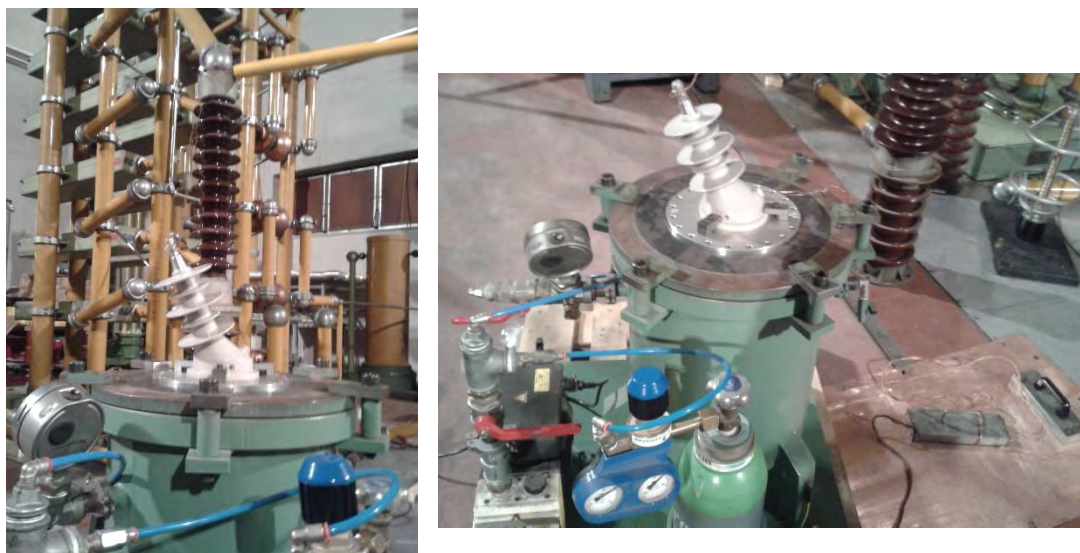


Fig. 5.80 configurazione della prova ad impulso

Per investigare il comportamento dell'isolatore alla prova ad impulso non siamo partiti subito con il picco di tensione di 70kV come previsto dalla normativa per il ciclo di 15+15 impulsi per la classe 12kV, ma la tensione V_0 è stata impostata inizialmente a 15kV sul singolo stadio

quindi a $15 \cdot n = 60 \text{ kV}$ totali che, tenendo conto del rendimento del castello, si riflettono in $V_p \approx 58 \text{ kV}$ sull'oggetto in prova.

Con questa tensione l'isolatore ha scaricato, come si può vedere dalla Fig.5.81.

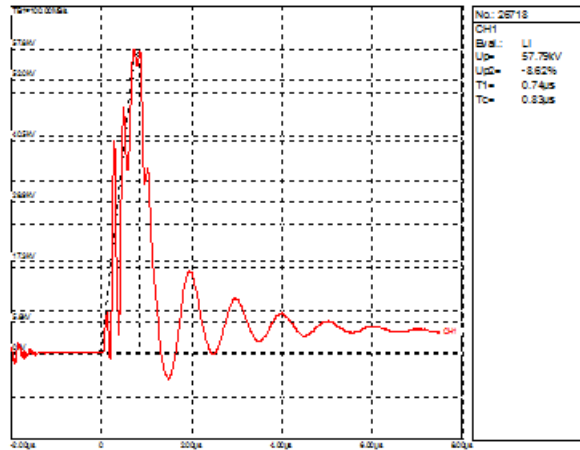


Fig. 5.81 scarica dell'isolatore con $V_p = 57.79 \text{ kV}$

A questo punto abbiamo provato a diminuire la tensione applicata: per farlo abbiamo riconfigurato il castello lasciando inseriti solo $n=2$ stadi, ottenendo $C_1 = 0.21/n = 0.105 \mu\text{F}$ e $R_c = 350 \cdot n = 700 \Omega$.

Impostando una tensione di 30 kV sul singolo stadio quindi di $30 \cdot n = 60 \text{ kV}$ totali, per effetto del rendimento si ha $V_p \approx 49 \text{ kV}$ sull'oggetto in prova: a questa tensione l'oggetto scarica. (Fig.5.82a). Anche con $25 \cdot n = 50 \text{ kV}$ totali, $V_p \approx 44 \text{ kV}$ effettivi, l'isolatore scarica. (Fig.5.82b)

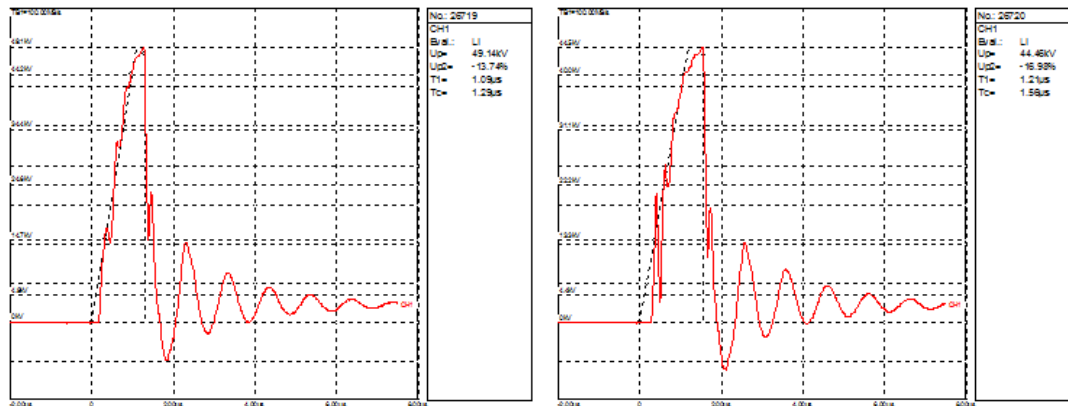


Fig. 5.82 scarica dell'isolatore con: a) $V_p = 49.14 \text{ kV}$, b) $V_p = 44.46 \text{ kV}$

Si deve scendere a $20 \cdot n = 40 \text{ kV}$ totali, $V_p \approx 36 \text{ kV}$ effettivi, perché l'isolatore non scarichi. (Fig.5.83)

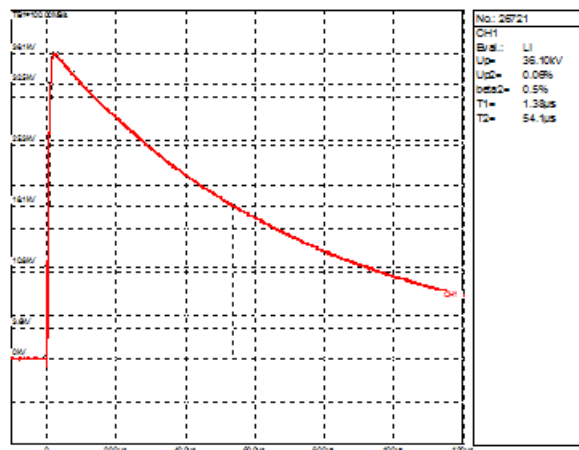


Fig. 5.83 tenuta dell'isolatore con $V_p=36.10kV$

Alla luce di questi risultati l'isolatore oggetto di studio non supera la prova ad impulso prevista per la classe 12kV di appartenenza. Tuttavia la specifica matricola sottoposta alla prova, benchè abbia superato il collaudo elettrico con il test a frequenza industriale e la misura della scariche parziali, potrebbe presentare al suo interno dei vucoi determinati da imperfezioni nel processo di stampaggio che, sollecitati dalla tensione impulsiva, ne hanno determinato la perforazione.

Per validare o smentire quest'ipotesi è stata sottoposta alla prova di tenuta ad impulso atmosferico un'altra matricola dello stesso lotto di produzione. Sono stati applicati alcuni impulsi "di avvicinamento" con tensioni di picco di 36kV- 45kV - 54kV - 62kV circa, ai quali l'isolatore non ha scaricato. Impostati 42kV per stadio, ovvero $40 \cdot n=80kV$ totali che per effetto del rendimento del castello si traducono in $V_p \approx 75kV$ sull'oggetto in prova, sono stati applicati 15 impulsi di polarità positiva e 15 impulsi di polarità negativa. La seconda matricola in prova non ha manifestato nessun fenomeno di scarica quindi ha superato la prova, in accordo con i risultati di simulazione.

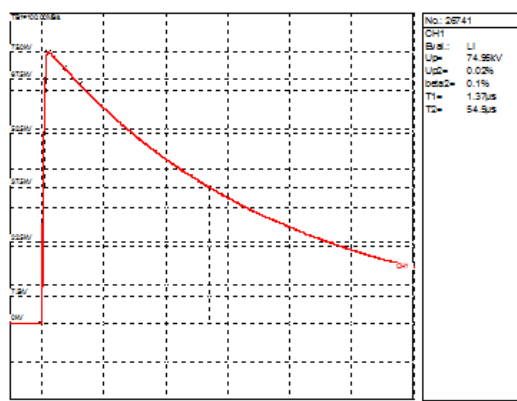


Fig. 5.84 tenuta ad impulso con $V_p=74.95kV$

Impulso	Pol. negativa	Pol. positiva
1	74.95 kV	75.75 kV
2	75.36 kV	75.82 kV
3	75.34 kV	75.69 kV
4	75.39 kV	75.68 kV
5	75.95 kV	75.7 kV
6	75.42 kV	75.68 kV
7	75.39 kV	75.67 kV
8	75.4 kV	75.61 kV
9	75.42 kV	75.95 kV
10	75.39 kV	75.68 kV
11	75.41 kV	75.65 kV
12	75.5 kV	75.18 kV
13	75.62 kV	75.58 kV
14	75.49 kV	75.57 kV
15	75.38 kV	75.60 kV

Tab. 5.29 valori di picco dei 15+15 impulsi applicati

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è cercato di valutare l'efficacia dell'utilizzo di un software basato sul metodo agli elementi finiti nello studio della distribuzione del campo elettrico in regime elettrostatico, finalizzato alla progettazione di isolatori per Media Tensione.

I casi progettuali riportati in 5.3, 5.4, 5.5 hanno evidenziato come *COMSOL*[®] consenta di stimare in maniera agevole il valore della capacità fra il conduttore centrale in tensione e lo schermo ad esso coassiale, ma vincolato a terra. Lo scostamento dei risultati delle simulazioni dalla media delle misure sperimentali è davvero minimo, perciò si possono sfruttare le potenzialità del software per individuare facilmente una geometria che soddisfi il target di progettazione in merito all'accoppiamento capacitivo.

Lo studio della distribuzione del campo elettrico mediante l'applicazione del metodo agli elementi finiti si rivela di estrema utilità anche quando la criticità del progetto è costituita dal livello delle scariche parziali, come nel caso presentato in 5.2. In questa situazione il software consente di verificare immediatamente l'effetto di riduzione sullo stress elettrico delle zone più sollecitate, ottenuto grazie alla variazione di alcune quote geometriche delle parti interne.

I risultati del post-processing delle simulazioni sono stati validati sperimentalmente anche per quanto riguarda la previsione sulla perforazione dell'isolatore durante la prova a frequenza industriale e di tenuta all'impulso atmosferico. La valutazione della possibilità di scarica in aria dell'isolatore si rivela invece abbastanza laborioso ed incerto: sia perché l'output della simulazione deve essere sottoposto ad elaborazioni successive, sia perché la modellizzazione matematica dei processi di scarica nei gas è ancora piuttosto approssimativa.

Il principale vantaggio dell'utilizzo di un software FEM consiste quindi nella possibilità di investigare con efficacia e rapidità i riflessi sulla distribuzione del campo elettrico della variazione delle quote geometriche dell'isolatore, evitando il giungere alla fase produttiva di progetti non completamente ottimizzati. Il progettista deve tuttavia avere consapevolezza che i risultati ottenuti con *COMSOL*[®] non tengono conto degli effetti che la qualità del processo di stampaggio e le caratteristiche chimiche della miscela esercitano sul comportamento dielettrico dell'isolatore.

In futuro l'utilizzo dei software basati sul metodo agli elementi finiti potrà supportare la progettazione di isolatori con funzionalità più complesse e dimensioni più compatte rispetto a quelli attualmente disponibili, nonché di risparmiare tempo e denaro sullo sviluppo di nuovi prodotti e sull'ottimizzazione di quelli già esistenti.

RINGRAZIAMENTI

GRAZIE a Papà e Mamma, a cui va tutto il mio affetto e la mia infinita riconoscenza. Il raggiungimento di questo importante traguardo è soprattutto merito vostro.

GRAZIE a Matteo, per avermi accompagnata con amore e fiducia durante il mio percorso di studi: ora possiamo finalmente iniziare la nostra vita insieme.

GRAZIE a Irene, per l'amicizia vera che ci lega...e GRAZIE al Villo, su cui ho sempre potuto contare per un consiglio e un confronto sincero. Siete stati i migliori coinquilini che potessi desiderare.

Ringrazio tutta la *Veneta Isolatori S.p.A.* per avermi introdotto nel mondo del lavoro, in particolare l'Ing.Ceschin che mi ha pazientemente seguita durante l'esperienza di stage.

Ringrazio il Prof.Pesavento e il Prof.Gobbo per la massima disponibilità dimostrata nei miei confronti e per la sapiente guida nello sviluppo di questa tesi di laurea.

APPENDICE A

Rilievi di capacità sull'isolatore per IMS da palo (vedasi 5.4) con RCL-meter.

matricola	capacità	C _{mis-C*}	C _{mis-C**}
1434309001	18.9 pF	0.401 pF	0.092 pF
1434309002	18.5 pF	0.801 pF	0.308 pF
1434309003	18.7 pF	0.601 pF	0.108 pF
1434309004	19.5 pF	0.199 pF	0.692 pF
1434309005	18.6 pF	0.701 pF	0.208 pF
1434309006	19.0 pF	0.301 pF	0.192 pF
1434309007	18.7 pF	0.601 pF	0.108 pF
1434309008	18.8 pF	0.501 pF	0.008 pF
1434309009	18.7 pF	0.601 pF	0.108 pF
1434309010	18.3 pF	1.001 pF	0.508 pF
1434309011	19.0 pF	0.301 pF	0.192 pF
1434309012	18.7 pF	0.601 pF	0.108 pF
1434309013	19.4 pF	0.099 pF	0.592 pF
1434309014	18.5 pF	0.801 pF	0.308 pF
1434309015	18.9 pF	0.401 pF	0.092 pF
1434309016	18.3 pF	1.001 pF	0.508 pF
1434309017	18.4 pF	0.901 pF	0.408 pF
1434309018	18.4 pF	0.901 pF	0.408 pF
1434309019	18.6 pF	0.701 pF	0.208 pF
1434309020	18.5 pF	0.801 pF	0.308 pF
1434309021	18.9 pF	0.401 pF	0.092 pF
1434309022	18.9 pF	0.401 pF	0.092 pF
1434309023	19.1 pF	0.201 pF	0.292 pF
1434309024	19.2 pF	0.101 pF	0.392 pF
1434309025	19.0 pF	0.301 pF	0.192 pF
1434309026	19.1 pF	0.201 pF	0.292 pF
1502105025	19.1 pF	0.201 pF	0.292 pF
1502105026	18.8 pF	0.501 pF	0.008 pF
1502105027	18.7 pF	0.601 pF	0.108 pF
1502105028	18.6 pF	0.701 pF	0.208 pF
1502105029	18.7 pF	0.601 pF	0.108 pF
1502105030	19.1 pF	0.201 pF	0.292 pF
1502105031	18.6 pF	0.701 pF	0.208 pF
1502105032	19.1 pF	0.201 pF	0.292 pF
1502105033	19.0 pF	0.301 pF	0.192 pF
MEDIA	18.8 pF	0.509 pF	0.244 pF

APPENDICE B

Risultati della prova a frequenza industriale e delle scariche parziali per l'isolatore per IMS da palo (vedasi 5.4) in classe 24kV.

matricola	50kV*1min	innesco	estinzione	20,8kV	14,5kV
1434309001	ok	31 kV	28 kV	2 pC	2 pC
1434309002	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309003	ok	25 kV	22 kV	2 pC	2 pC
1434309004	ok	16 kV	13 kV	60 pC	2 pC
1434309005	ok	55 kV	46 kV	2 pC	2 pC
1434309006	ok	28 kV	23 kV	2 pC	2 pC
1434309007	ok	6 kV	5 kV	680 pC	2 pC
1434309008	ok	51 kV	43 kV	2 pC	2 pC
1434309009	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309010	ok	19 kV	17 kV	12 pC	2 pC
1434309011	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309012	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309013	ok	40 kV	34 kV	2 pC	2 pC
1434309014	ok	39 kV	30 kV	4 pC	2 pC
1434309015	ok	25 kV	19 kV	20 pC	2 pC
1434309016	ok	34 kV	30 kV	2 pC	2 pC
1434309017	ok	34 kV	30 kV	2 pC	2 pC
1434309018	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309019	ok	32 kV	25 kV	2 pC	2 pC
1434309020	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309021	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1434309022	ok	40 kV	34 kV	2 pC	2 pC
1434309023	ok	27 kV	24 kV	2 pC	2 pC
1434309024	ok	27 kV	23 kV	2 pC	2 pC
1434309025	ok	27 kV	25 kV	2 pC	2 pC
1434309026	ok	29 kV	26 kV	2 pC	2 pC
1502105025	ok	34 kV	30 kV	2 pC	2 pC
1502105026	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1502105027	ok	35 kV	31 kV	2 pC	2 pC
1502105028	ok	38 kV	32 kV	2 pC	2 pC
1502105029	ok	36 kV	33 kV	2 pC	2 pC
1502105030	ok	52 kV	42 kV	2 pC	2 pC
1502105031	ok	55 kV	55 kV	2 pC	2 pC
1502105032	ok	52 kV	44 kV	2 pC	2 pC
1502105033	ok	35 kV	30 kV	2 pC	2 pC

APPENDICE C

Risultati del collaudo elettrico e dei rilievi di capacità sull'isolatore passante da esterno con TA e presa capacitiva (vedasi 5.5).

numero	innesco	estinzione	10,4kV	7,3kV	42kV*1min	Cmis
1435204001	--	--	--	--	nok	--
1435204002	10 kV	5 kV	9999 pC	9999 pC	nok	--
1435204003	38 kV	16 kV	2 pC	2 pC	ok	25.2 pF
1435204004	41 kV	26 kV	2 pC	2 pC	ok	25.7 pF
1435204005	38 kV	22 kV	2 pC	2 pC	ok	25.8 pF
1435204006	30 kV	18 kV	2 pC	2 pC	ok	25.6 pF
1435204007	19 kV	14 kV	2 pC	2 pC	ok	25.6 pF
1435204008	33 kV	14 kV	2 pC	2 pC	ok	25.5 pF
1435204009	29 kV	23 kV	2 pC	2 pC	ok	25.4 pF

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Lupò, appunti del corso di Modellistica Elettromagnetica dei Materiali, Napoli: Università degli Studi Federico II, 2009/2010.
- [2] G. Baldo, *Tecnica delle Alte Tensioni*, Padova: CLEUP, 2004.
- [3] G. Marchesi, *Materiali per l'Ingegneria Elettrica*, Padova: Libreria Progetto, 1999.
- [4] G. Scarinci e E. Bernardo, *Introduzione ai Materiali Polimerici*, Padova: Libreria Progetto, 2006.
- [5] S. Bruckner, *Scienza e Tecnologia dei Materiali Polimerici*, Napoli: EdiSES, 2001.
- [6] G. Lottanti e L. Preatoni, *L'importanza del Tg per la valutazione e le caratteristiche dei sistemi epossidici*, Bakelite GmbH, 1993.
- [7] Makishima, Nakamo, Koyama e Inoue, «Dielectric Property of Curing Epoxy Resin and Application for Casting Processes,» *IEEE*, vol. Proceedings of Electrical Electrical Insulation Conference, pp. 565-569, 1995.
- [8] G. Lottanti, *La scelta dei sistemi epossidici per l'iniezione*, Bakelite GmbH, 1990.
- [9] I. Preda, J. Castellon, H. Couderc e M. Fréchet, «Dielectric Response of Filled and Flexibilised Epoxy Resin,» *IEEE*, pp. 53-58, 2012.
- [10] HUNTSMAN, «Introduction to Electrical Testing,» in *Material Testing: Electro*, 2001.
- [11] M. Beyer, *Electrical and Dielectric Behaviour of Cast Epoxy Resin*, Basilea: Hannover University, 1991.
- [12] S. Singha e J. T. M., «Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 12-23, 2008.
- [13] S. Dodd, Chalashkanov, F. J.C. e L. Dissado, «Influence of Temperature on the Dielectric Properties of Epoxy Resins,» *IEEE*, vol. 2010 International Conference on Solid Dielectrics, pp. 1-4, 2010.
- [14] G. Iyer, R. Gorur e R. Richert, «Dielectric Properties of Epoxy Based Nanocomposited for High Voltage Insulation,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 659-666, 2011.
- [15] D. Fabiani, G. Montanari, A. Krivida e E. Schimdt, «Epoxy Based Materials Containing Micro and Nano Sized Fillers for Improved Electrical Characteristics,» *IEEE*, vol. International Conference on Solid Dielectrics, pp. 1-4, 2010.
- [16] I. Vendik, V. Afanasjev, I. Sokolova e D. Chigirev, «Correlation between Electrical and Mechanical Properties of Polymer Composite,» *IEEE*, vol. Electronic Components and Technology Conference, pp. 1697-1702, 2011.
- [17] A. Fukuda, H. Mitsui, Y. Inoue e K. Goto, «The Influence of Water Absorption on Dielectric Properties of Epoxy Resins,» *IEEE*, vol. Proceedings of the fifth International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 58-61, 1997.

- [18] M. Frechette, E. David, D. Martinez e S. Savoie, «Post-heat Treatment Effect on the Dielectric Response of Epoxy Samples,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 705-708, 2009.
- [19] T. Imai, F. Sawa e T. Nakano, «Effects of Nano- and Micro-Fillers Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 319-326, 2006.
- [20] M. Klampar, M. Spohner e P. Skarvada, «Dielectric Properties of Epoxy Resins and their Accelerated Ageing,» *IEEE*, vol. Electrical Insulation Conference, pp. 286-290, 2013.
- [21] HUNTSMAN, «Long Term Behaviour of Epoxy Resins,» in *Material Testing: Thermal*, 2004.
- [22] F. Gutfleisch e L. Niemeyer, «Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 729-743, 1995.
- [23] M. Olyphant, «Breakdown by Treeing in Epoxy Resins,» *IEEE*, pp. 1106-1112, 1963.
- [24] S. Bahadoorsingh e S. Rowland, «The Role of Power Quality in Electrical Treeing of Epoxy Resin,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 221-224, 2007.
- [25] Z. Ding e R. Varlow, «Electrical Treeing Studies on the Araldite LY/HY 5052 Epoxy Resin over a Wide Range of Stressing Voltage,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 306-309, 2004.
- [26] R. Kurnianto, Y. Murakami e M. Nagao, «Investigation of Filler Effect on Treeing Phenomenon in Epoxy Resin under AC Voltage,» *IEEE*, pp. 1112-1119, 2008.
- [27] R. Vogelsang, R. Brutsch, T. Farr e K. Frolich, «Electrical Tree Propagation along Barrier Interfaces in Epoxy Resin,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 946-950, 2002.
- [28] M. Nagao, K. Oda, K. Nishioka e Y. Muramoto, «Effect of Moisture on Treeing Phenomenon in Epoxy Resin with Filler under AC Voltage,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 951-954, 2002.
- [29] B. Lutz e J. Kindersberger, «Influence of Absorbed Water on Volume Resistivity of Epoxy Resin Insulators,» *IEEE*, vol. International Conference on Solid Dielectrics, pp. 1-4, 2010.
- [30] CESI, «Utilizzo dei Materiali Organici nelle Costruzioni Elettromeccaniche,» Milano.
- [31] S. Basuki, «Mitigation of Outdoor Insulation Failure using Silicone Coating,» *IEEE*, vol. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, pp. 40-46, 2011.
- [32] C. Chen e Y. Lin, «Study on the Influencing Factors of Natural Degradation of Liquid Silicone Rubber used for External Insulation,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 128-131, 2013.
- [33] M. Amin, M. Akbar e S. Amin, «Hydrophobicity of Silicone Rubber used for Outdoor Insulation,» *IEEE*, vol. Transactions on Power Delivery, pp. 2-26, 2007.
- [34] MOMENTIVE, «The Success Story of Silicones,» 2012.

- [35] S. Ansorge e F. Schmuck, «Improved Silicone Rubbers for the Use as Housing Material in Composite Insulators,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 209-217, 2012.
- [36] Y. Zhou, L. R. e F. Zhang, «Moisture Absorption Characteristics of Silicone Rubber and Its Effects on Dielectric Properties,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 430-433, 2013.
- [37] J. Andersson, S. Gubanski e H. Hilborg, «Properties of Interfaces between Silicone Rubber and Epoxy,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 1360-1367, 2008.
- [38] D. Nguyen e A. Sylvestre, «Dielectric Properties Analysis of Silicone Rubber,» *IEEE*, n. International Conference on Solid Dielectrics, pp. 56-60, 2004.
- [39] N. Qiong, Z. Yuanxiang e Z. Chen, «Effect of Frequency on Electrical Tree Characteristics in Silicone Rubber,» *IEEE*, vol. Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 513-516, 2009.
- [40] E. Cherney, «Silicone Rubber Dielectrics Modified by Inorganic Fillers for Outdoor High Voltage Insulation Applications,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 1-9, 2005.
- [41] F. Wang, P. Zhang e M. Gao, «Improvement in Electric Field Distribution of Silicone Rubber Composite Insulators by Non-linear Fillers,» *IEEE*, vol. Strategic Technology (IFOST) 8th International Forum, pp. 217-223, 2013.
- [42] A. Krivida e L. Schmidt, «Inclined-Plane Tracking and Erosion Test According to the IEC 60587 Standard,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 263-267, 2008.
- [43] J. Seifert, H. Winter e R. Barsch, «Tracking and Erosion Performance of Liquid Silicone Rubber Composite Insulator Housings,» *IEEE*, vol. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 329-337, 2007.
- [44] R. Gorur e J. Montesinos, «Electrical Performance of Cycloaliphatic Epoxy Materials and Insulators for Outdoor Use,» *IEEE*, vol. Transactions on Power Delivery, pp. 1274-1278, 2000.
- [45] HUNTSMANN, «Cycloaliphatic Epoxy Resins,» vol. Meeting of the thermoset resin formulators, 2007.
- [46] S. Kumagai e N. Yoshimura, «Impacts of Thermal Aging and Water Absorption on the Surface Electrical and Chemical Properties of Cycloaliphatic Epoxy Resin,» *IEEE*, vol. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 424-429, 2000.
- [47] S. Ardianto, «Characteristics of Leakage Current and Flashover on Epoxy Resin Insulator,» *IEEE*, Vol. 1 di 2 Workshop on Electronics, Computer and Applications, pp. 754-757, 2014.
- [48] C. Beisele e B. Kultzow, «Experiences with New Hydrophobic Cycloaliphatic Epoxy Outdoor Insulation Systems,» *IEEE*, pp. 33-39, 2001.
- [49] J. Rocks, U. Kaltenborn e T. Hucke, «Intrinsic Hydrophobic Epoxies for Outdoor Insulation,» *IEEE*, vol. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 234-237, 2000.

- [50] C. Beisele, «New Outdoor Systems with Hydrophobic Properties,» in *World Congress on Insulator Technologies for the Year 2000 and Beyond*, Barcellona, 2000.
- [51] R. Arora e W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, Wiley, 2011.
- [52] S. Badaloni e I. Gallimberti, *Basic Data of Air Discharges*, Padova, 1972.