

CORSO DI
MATERIALI
E
TECNOLOGIE ELETTRICHE

INVECCHIAMENTO (AGEING)

Prof. Giovanni Lupò
Dipartimento di Ingegneria Elettrica
Università di Napoli Federico II
Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica – III anno – II semestre
a.a. 2009/10

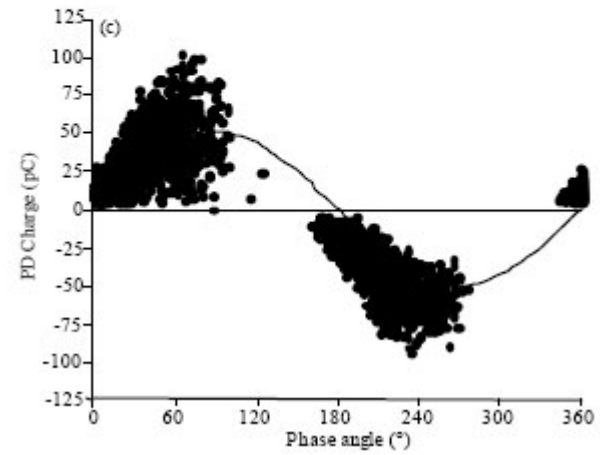
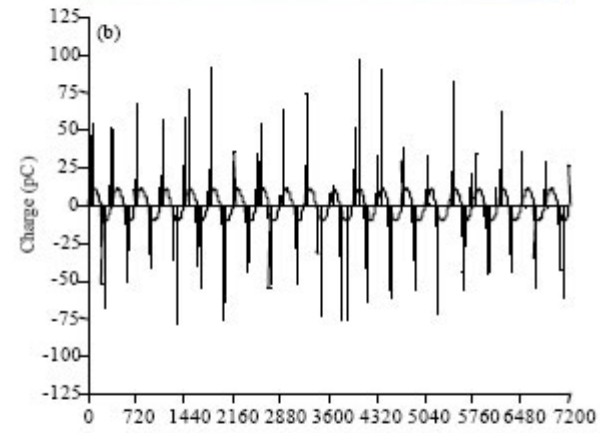
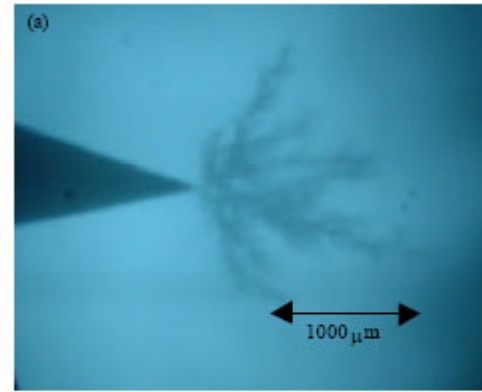
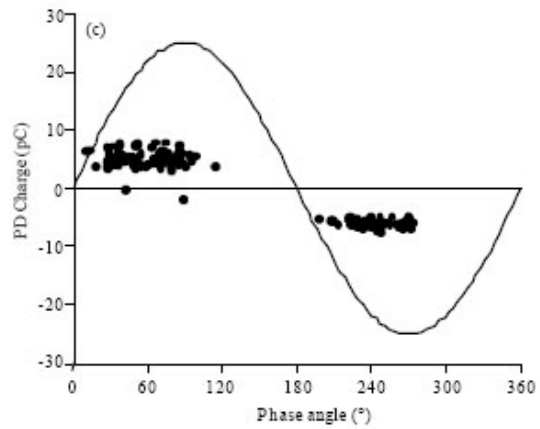
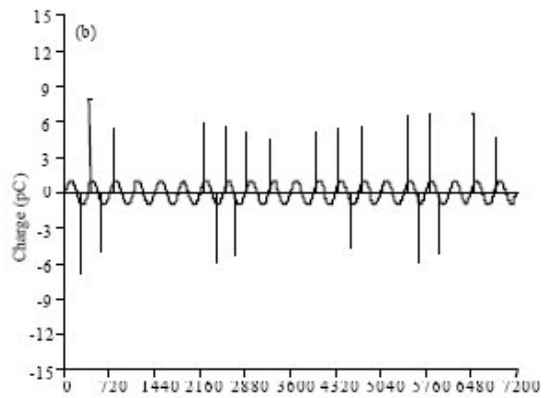
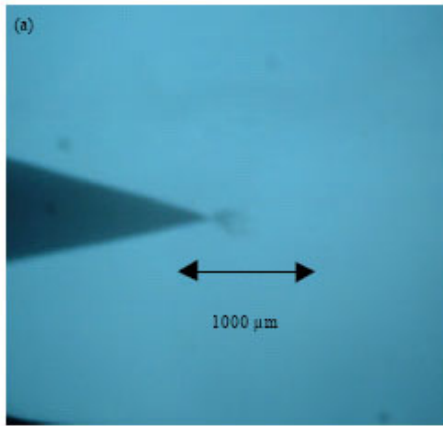
-X-

Invecchiamento

- **Degrado di una proprietà**
- **Durata di vita: intervallo in cui il degrado si mantiene entro limiti accettati**
- **Previsione di vita in base alla dinamica del degrado**
- **Cause dell'invecchiamento : singole o combinate**

Esempi di degrado





Cause singole di invecchiamento di un materiale

Sollecitazione termica
Campo elettrico
Correnti superficiali su superfici pollute.
Radiazioni UV.
Azioni chimiche (SF₆ decomposto, effetti ambientali, nebbia salina...)
Fatica meccanica
....

Indici di invecchiamento

- Perdita di peso
- Ossidazione
- Diminuzione delle temperature di transizione
- Disordine strutturale in materiali cristallini
- diminuzione delle prestazioni meccaniche
-
-

MODELLI DI INVECCHIAMENTO

- *Modelli fisici*, basati sulla conoscenza dei processi di degrado
- *Modelli fenomenologici*, basati sull'analisi di prove accelerate

GENERALITA'

- **P = proprietà presa in considerazione**
- **P_i = valore iniziale di P ($t = 0$)**
- **P_f = suo valore limite ($t = D$)**
- **S = valore della sollecitazione**
- **t = tempo**
- **D, L = durata di vita (tempo necessario a raggiungere P_f)**

CRITERIO DI FINE VITA:

$$\Delta P_f = \frac{P_i - P_f}{P_i} 100$$

a P_f , dato P_i , corrisponde un valore (assoluto) di ΔP_f , quindi un valore della vita D.

Il valore adottato per il criterio di fine vita determina il margine di sicurezza per l'impiego del materiale.

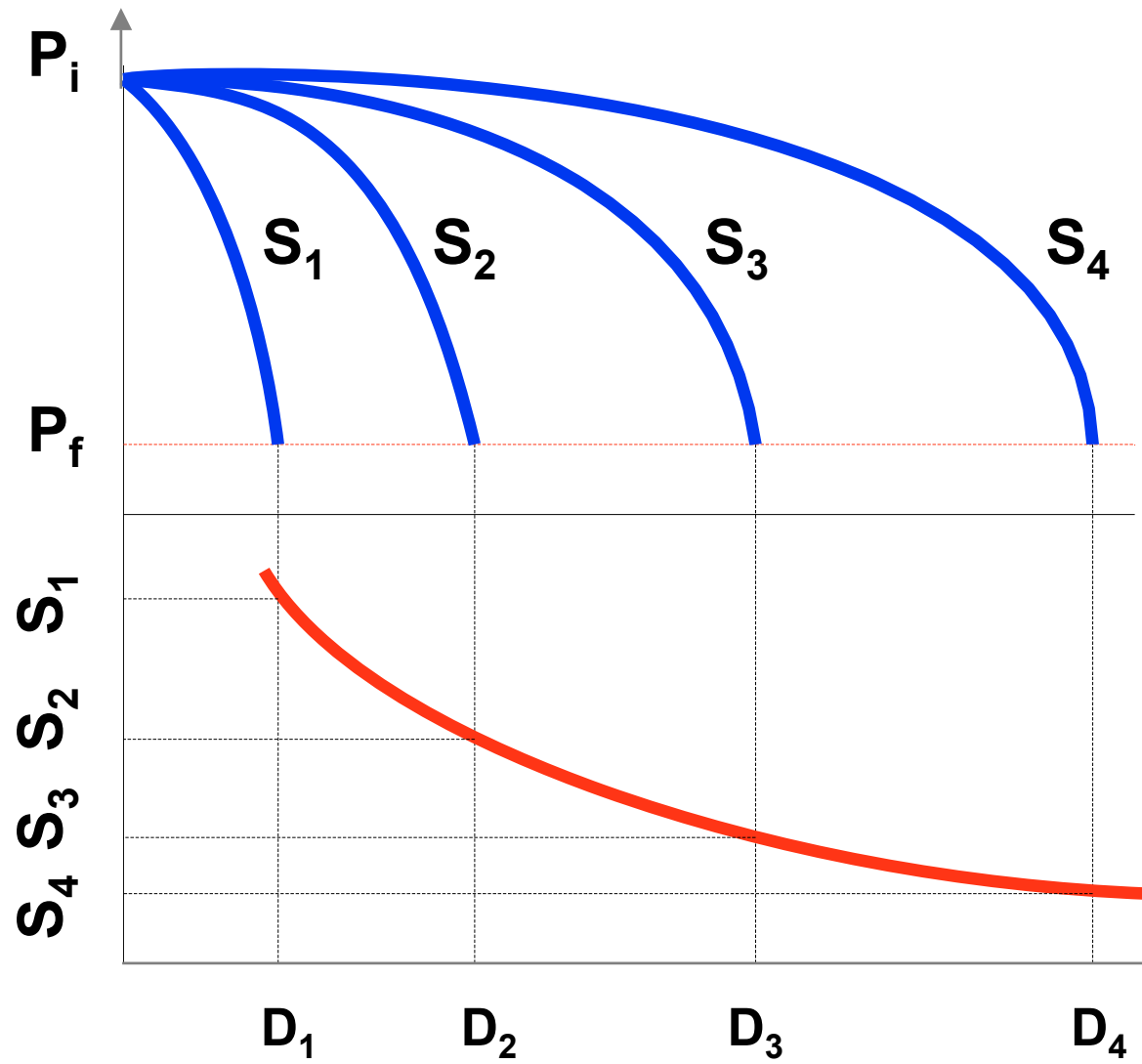
L'invecchiamento del materiale può essere descritto con la funzione:

$$f(S, P, t) = 0$$

per $S = \text{costante}$ si ha

$$f(P, t) \Big|_{S=\text{cost}} = 0$$

[famiglia di curve (di degradazione) con S come parametro]



La CURVA DI VITA é definita dall'equazione:

$$f(S, D) |_{P=P_f} = 0$$

che fornisce la relazione fra la sollecitazione applicata ed il tempo necessario per la proprietà a decrescere (o crescere) fino al valore corrispondente al criterio di fine vita, cioè D.

Se le curve $P = P(t)$ sono monotone ed S non dipende dal tempo, si può ipotizzare l'esistenza di una funzione o funzionale $F(P)$ tale che

$$F(P) = K(S) \cdot t$$

- F dipende dal tipo di materiale e da S .
- K dipende dal tipo e valore della sollecitazione e rappresenta la **velocità di variazione** di $F(P)$ nel tempo.

Per $P = P_f$ si ha $t = D$ e, dato un certo tipo di sollecitazione, si ha

$$F(P_f) = K(S) \cdot D = K_f \Rightarrow D = \frac{K_f}{K(S)}$$

Equazione di vita

ed in definitiva:

$$F(P) = K_f \frac{t}{D}$$

La funzione $F(P)$ descrive l'effetto cumulativo dell'invecchiamento.

INVECCHIAMENTO TERMICO

La sollecitazione termica è il più diffuso e studiato meccanismo di guasto, in particolare per gli isolamenti elettrici organici. Qualitativamente l'aumento di temperatura prodotto dalla somministrazione del calore accelera le reazioni chimiche che presiedono alla degradazione del materiale.

Ip.: c'è una reazione chimica prevalente con velocità K_R . La velocità di reazione è legata alla temperatura dalla **legge di Arrhenius:**

$$K_R = A_R \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

con:

- ΔE = energia di attivazione della reazione della degradazione termica
- T = temperatura assoluta
- k = costante di Boltzman
- A_R = costante del materiale

Se si ammette che la velocità di invecchiamento $K(T)$ sia pari alla velocità della reazione chimica, si ha:

$$K(T) = A_1 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

e quindi:

$$A_1 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \cdot D = K_f$$

da cui

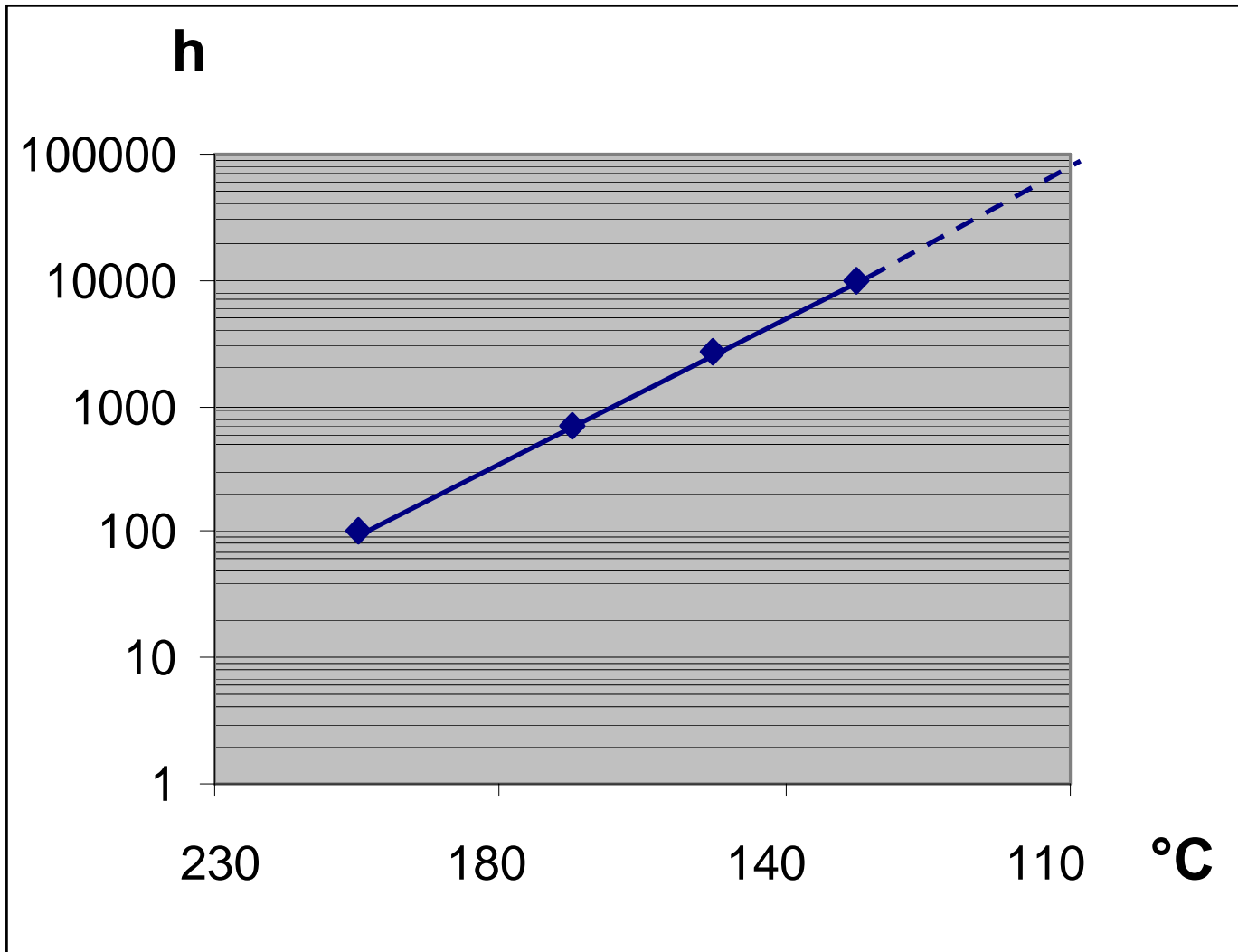
$$D = A \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

Se si assume un valore di riferimento t_0 dei tempi, si può porre $d = D / t_0$ e passare ai logaritmi. L'equazione di vita termica diventa:

$$\ln(d) = \frac{\Delta E}{kT} + a$$

equazione che nel piano $(\ln(d), 1/T)$ rappresenta una retta di pendenza

$$\frac{\Delta E}{k}$$



**RETTA
DI VITA
TERMICA**

- **LA RETTA DI ARRHENIUS, O RETTA DI VITA TERMICA, PUÒ ESSERE TRACCIATA SERVENDOSI DEI RISULTATI DI PROVE DI VITA ACCELERATE.**
- **I PUNTI SPERIMENTALI DEVONO ESSERE ALMENO 3 o 4.**
- **SE LA REAZIONE DI DEGRADAZIONE NON CAMBIA CON LA TEMPERATURA, SI TROVA, PER ESTRAPOLAZIONE, LA VITA ALLA TEMPERATURA DI SERVIZIO.**

VALIDITÀ DEL MODELLO DI ARRHENIUS

Il modello di Arrhenius è valido se è presente un'unica reazione chimica dominante, che non cambia nel campo di temperature delle prove.

INVECCHIAMENTO ELETTRICO

L'invecchiamento prodotto dal campo elettrico produce tre tipi di fenomeni:

- **Invecchiamento di massa**
- **Fenomeni di arborescenza (treeing)**
- **Scariche parziali**

ARBORESCENZA: elettrica, d'acqua o chimica.

La presenza nell'isolamento di microgocce di elettrolita, in particolare acqua, può causare fenomeni di arborescenza elettrochimica, riportati in letteratura come **water treeing** o come **electrochemical treeing**.

Pur essendo questi fenomeni fra loro interconnessi, allo stato attuale non è disponibile un modello matematico applicabile in tutti i casi.

**L'INVECCHIAMENTO DOVUTO
ALL'APPLICAZIONE DI TENSIONE
ALTERNATA È CAUSATO DA:**

- **PRODUZIONE DI CALORE DOVUTA A
PERDITE DIELETTICHE**
- **FATICA MECCANICA DOVUTA A FORZE
ELETTROSTATICHE**
- **PROCESSI ELETTROCHIMICI**

MODELLO (FENOMENOLOGICO) PER L'INVECCHIAMENTO ELETTRICO

In generale, per l'invecchiamento elettrico in corrente alternata, si può assumere la seguente legge:

dove:

$$D = L = CE^{-n}$$

Modello della potenza
inversa (IPM)

E = valore efficace del campo elettrico

C ed **n** = costanti del materiale.

Nota: deriva da modello di invecchiamento meccanico.

la velocità di invecchiamento vale:

$$K(E) = \frac{K_f}{C} \cdot E^n$$

Date due coppie di valori (E_1, L_1) e (E_2, L_2) , è possibile ottenere n dalla relazione:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^n$$

Oppure, avendo un punto della curva di vita, cioè una coppia di valori (E , L) e l'esponente n , è possibile trovare il valore di L corrispondente a ciascun valore di E .

Rappresentazione del modello di vita in modo relativo: si assumono due valori di riferimento, rispettivamente t_0 per i tempi e E_0 per i gradienti, ad esempio per E_0 il valore di rigidità dielettrica misurato applicando un gradino di tensione di durata t_0 .

Si pone:

$$l = L/t_0 \quad e = E/E_0$$

passando ai logaritmi si ha:

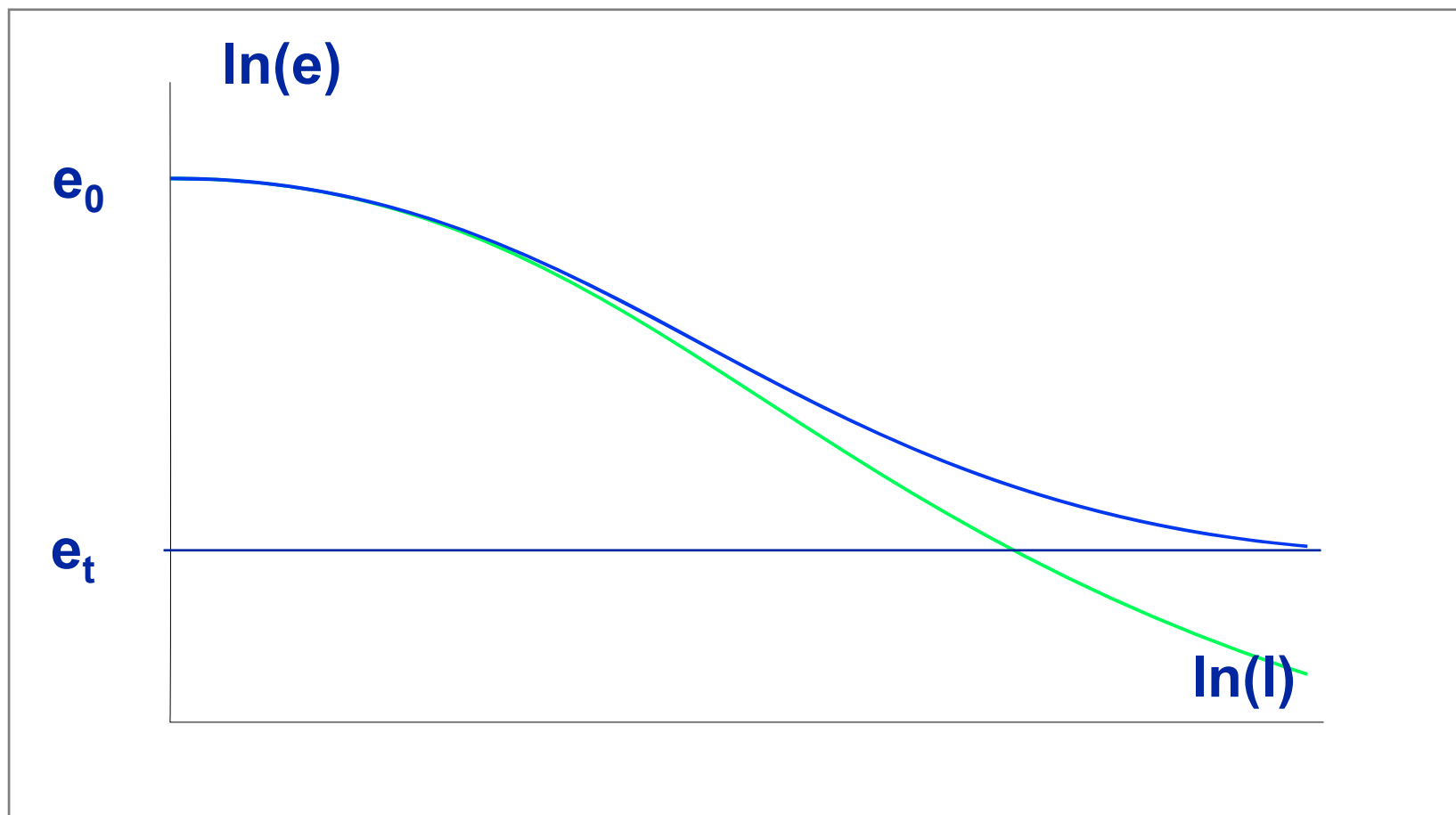
$$\ln(l) = -n \cdot \ln(e)$$

n: coefficiente di resistenza alla sollecitazione elettrica: VEC (voltage endurance coefficient)

CAMPO ELETTRICO DI SOGLIA

Alcuni materiali, come le resine epossidiche, hanno curve di vita elettrica con una evidente soglia orizzontale E_t del gradiente E , al di sotto della quale il materiale può essere impiegato con sicurezza (per quel che riguarda la degradazione elettrica), mentre altri polimeri, come il polietilene a bassa densità (LDPE), presentano un valore di tale soglia molto basso.

CURVA DI VITA ELETTRICA DI DUE MATERIALI CON DIVERSO GRADIENTE DI SOGLIA



Nel primo caso il progetto dell'isolamento, benché basato su grandezze ottenute dall'applicazione della statistica, può essere realizzato in maniera deterministica, controllando, per esempio, che la soglia del gradiente sia in ogni punto più elevata del campo elettrico applicato.

Nel secondo caso, la presenza di un valore di soglia molto basso, inferiore ad un valore accettabile per il gradiente di servizio può costringere a verificare, per mezzo di strumenti statistici, che la probabilità di cedimento del sistema d'isolamento sia più bassa di un predefinito valore, considerato accettabile.

DISTRIBUZIONE DI WEIBULL

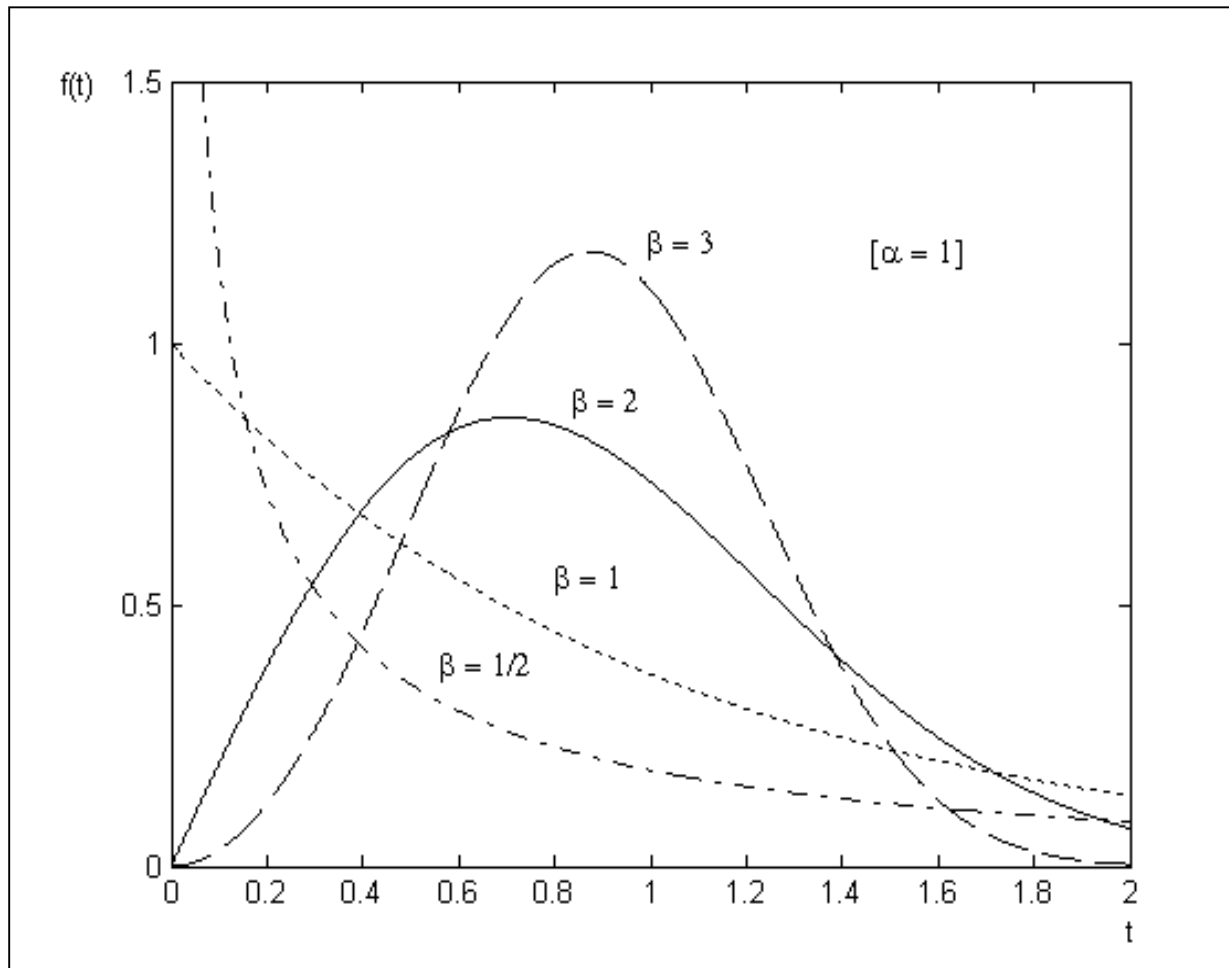
Si adatta molto bene a rappresentare un'ampia gamma di variabili aleatorie continue (è un caso generale di quella esponenziale e tende alla distribuzione gaussiana per $\beta \cong 3$). E' una funzione dei valori estremi minimi, adatta ai processi di rottura.

DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ DI WEIBULL A 2 PARAMETRI:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

Dove α è il parametro di scala (valore di t per cui la probabilità è il 63.2%) e β è il parametro di forma (misura dell'intervallo di variazione di t , dispersione dei risultati)

Nota: α e $\beta > 0$



**Densità di probabilità di Weibull,
per diversi valori di β ($\alpha = 1$)**

LINEARIZZAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DI WEIBULL

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right)$$

$$\ln(1 - F(x)) = -\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta$$

$$\ln(-\ln(1 - F(x))) = \ln\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta$$

$$\ln \frac{1}{\ln(1 - F(x))} = \beta \ln(x) - \beta \ln \alpha$$

Ponendo:

$$y' = \ln \frac{1}{\ln(1 - F(x))}$$
$$x' = \ln(x)$$
$$a = -\beta \log \alpha$$

si arriva a:

$$y' = \beta x' + a$$

MODELLO ELETTRICO-PROBABILISTICO

Consiste nell'applicazione dei modelli di vita fisici o fenomenologici al progetto statistico di un sistema isolante. Nasce dall'esigenza di tener conto dei processi di invecchiamento nel calcolo dell'affidabilità di un componente. Con questa metodologia, si ottengono valori di sollecitazione tale da consentire al sistema isolante di avere una determinata durata L , con un affidabilità R . Es. : i cavi AT sono progettati per durare 30 anni con un'affidabilità pari al 99%.

Si consideri che il sistema isolante segua il modello di vita della potenza inversa, e che quindi valgano le relazioni:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^n \Rightarrow L = L_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-n} \Rightarrow L = L_{63.2\%} \cdot \left(\frac{E}{E_{63.2\%}} \right)^{-n}$$

Dove $L_{63.2\%}$ è il valore di vita calcolato con una probabilità del 63.2%.

Se si tiene conto che l'affidabilità di un sistema è definita come il complemento a 1 della probabilità, si ha, nel caso di distribuzione di Weibull:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

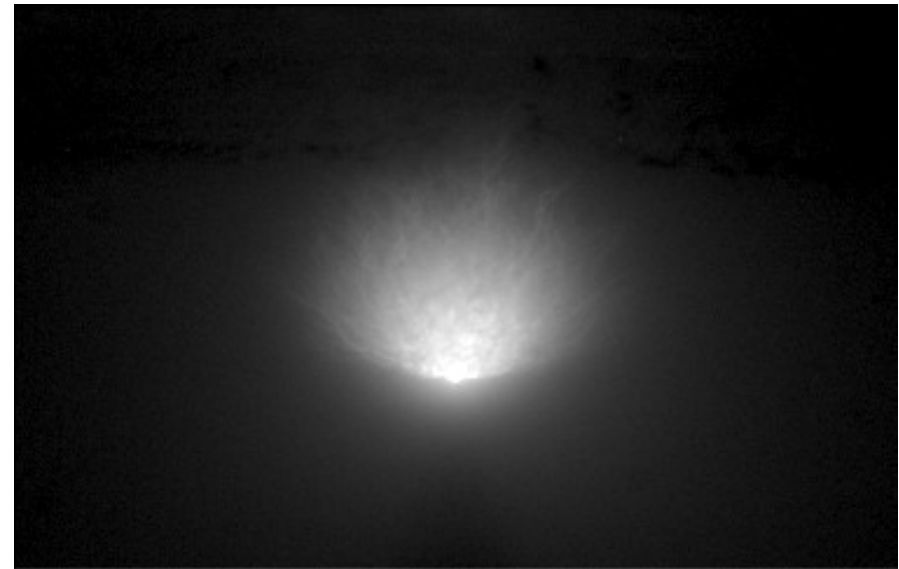
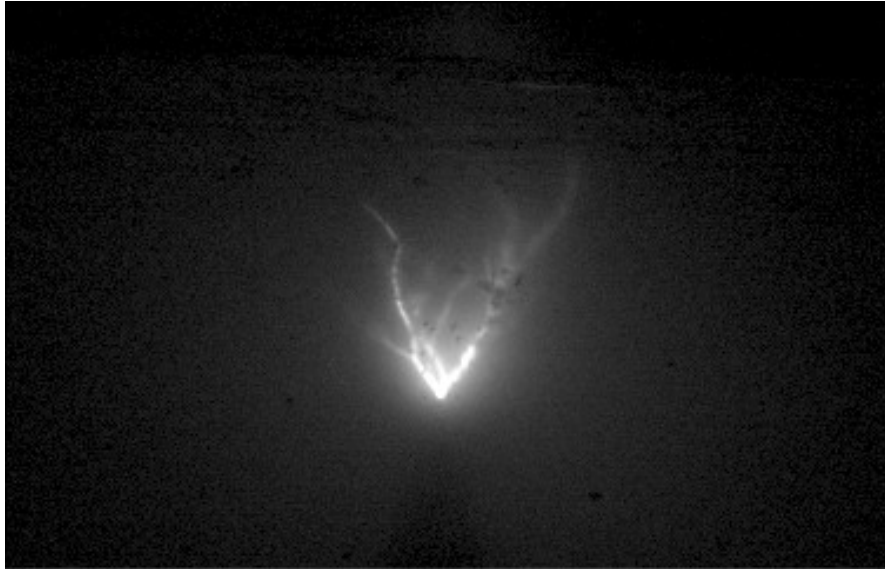
Quindi, fissato il valore dell'affidabilità R (es. 99%), e la durata t pari ad L (es. 30 anni), si ottiene la seguente espressione:

$$R = \exp \left[- \left(\frac{L}{L_{63.2\%}} \right)^\beta \right]$$

dalla quale, ricavando $L_{63.2\%}$, è possibile calcolare il valore della sollecitazione E.

ARBORESCENZA ELETTRICA

Questo fenomeno, fino all'innesco, può avere le caratteristiche di un processo di degradazione a breve termine, sotto alti campi elettrici. Tuttavia va anche considerata un fenomeno d'invecchiamento che, a bassi campi elettrici, conduce alla scarica totale, dopo un processo di degradazione di massa o causata da scariche parziali.



(a)

(b)

Acquisizioni ottiche relativi a fenomeni di tree di tipo ramificato (a) e di tipo a cespuglio (b), ottenuti in un provino di XLPE con geometria elettrodica di tipo punta-piano.

Prove di resistenza all'arborescenza elettrica

È possibile effettuare prove ad una tensione costante $V < V_i$ (tensione d'innescò del tree), misurando il tempo di innescò t_i . In questo caso si può porre:

$$t_i = A \cdot V^{-m}$$

e se l'esponente m ed una coppia di valori (t_{i1}, V_1) sono conosciuti, si ha:

$$t_{i2} = t_{i1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^m$$

m non è costante, ma aumenta al diminuire di V, suggerendo la possibilità di esistenza di una soglia. Il tempo intercorrente fra l'applicazione della tensione V e l'innescò dell'arborescenza rappresenta la vita del materiale, e l'innescò costituisce il criterio di fine vita.

WATER TREEING

- **Questo fenomeno da luogo a tipiche strutture dendritiche.**
- **Segue leggi relativamente complesse, risultato dell'azione di sollecitazioni multiple.**
- **Lo stadio finale dell'arborescenza elettrochimica, che precede la scarica totale, evolve in una arborescenza elettrica.**

Meccanismo spiegato da processi tipo dielettroforesi, elettroforesi, diffusione. Occorre l'applicazione del campo elettrico per causare water tree (anche in materiali idrorepellenti come PE)

SCARICHE PARZIALI

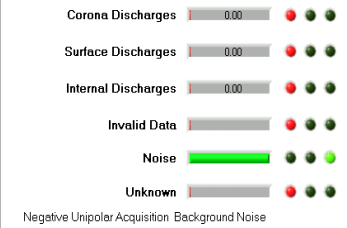
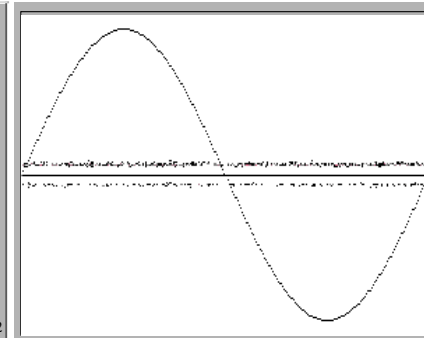
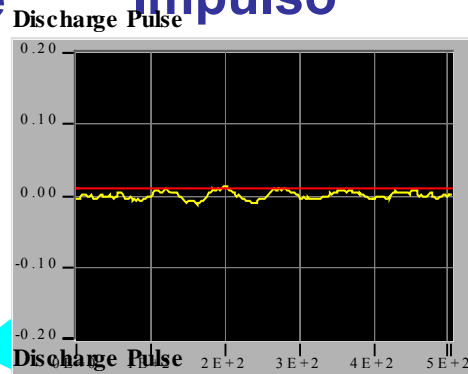
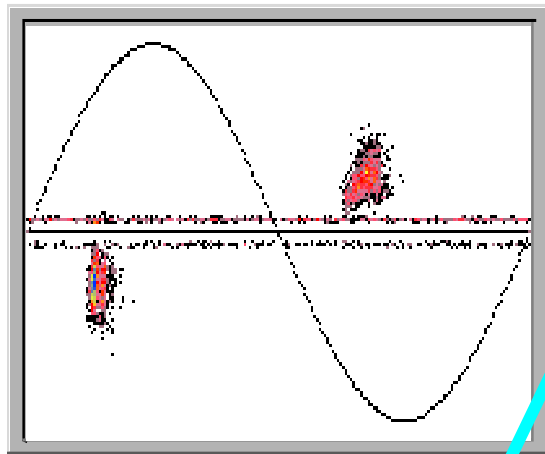
LE SCARICHE PARZIALI COSTITUISCONO UNO DEI PRINCIPALI MECCANISMI DI INVECCHIAMENTO DI UN ISOLAMENTO, MA ANCHE UN EFFETTO DELL'INVECCHIAMENTO DEL MATERIALE PER CAUSE ELETTRICHE O MECCANICHE.

CI SONO MODELLI DI VITA BASATI SULLA CRESCITA DEL DANNO CAUSATO DALLE VALANGHE ELETTRONICHE ALL'INTERNO DI CAVITA' NEL MATERIALE.

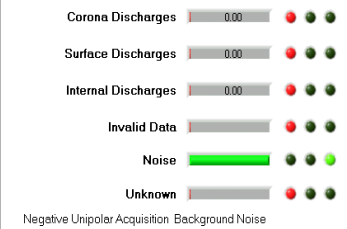
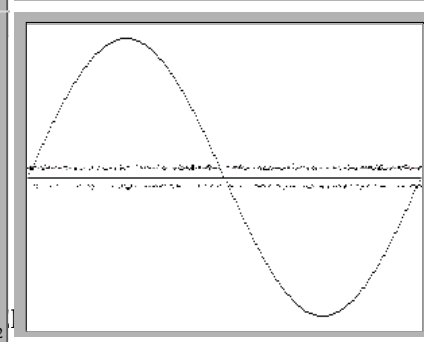
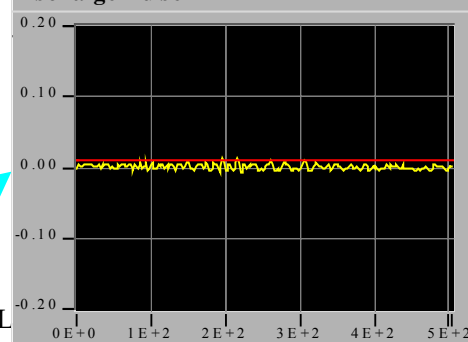
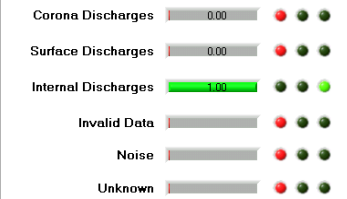
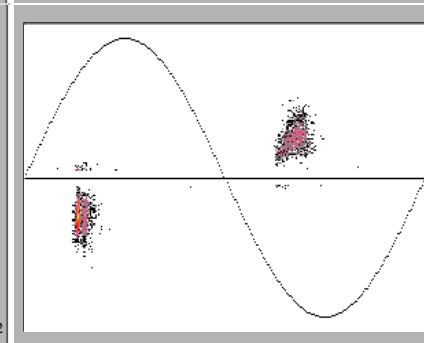
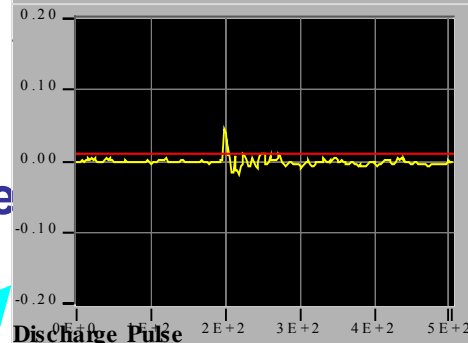
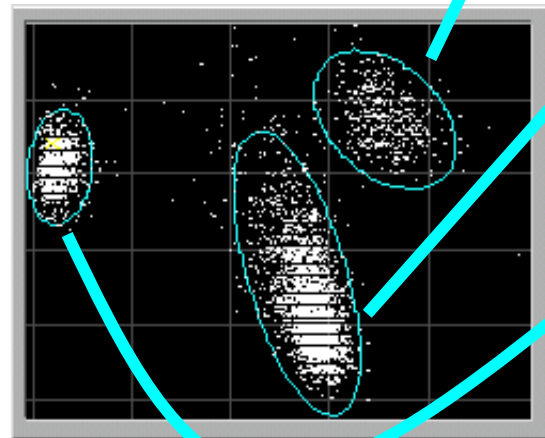
REIEZIONE DEL RUMORE

Processo di classificazione ed identificazione

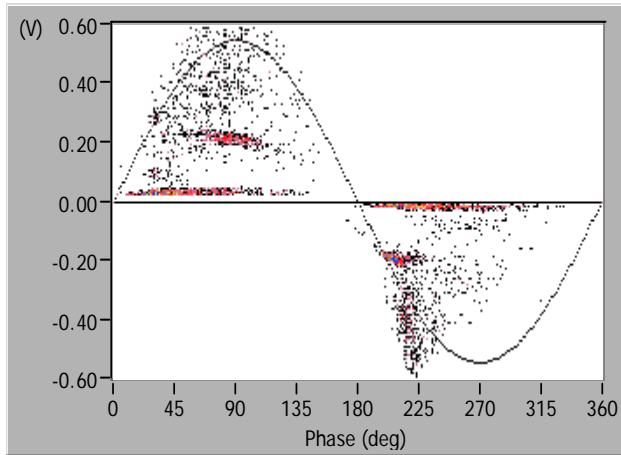
PRPD Pattern originale Impulso Sub-Pattern Identificazione



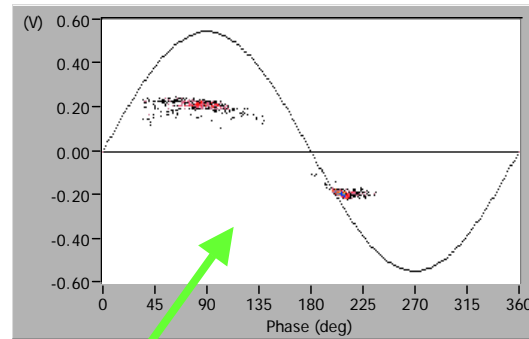
Mappa di classificazione



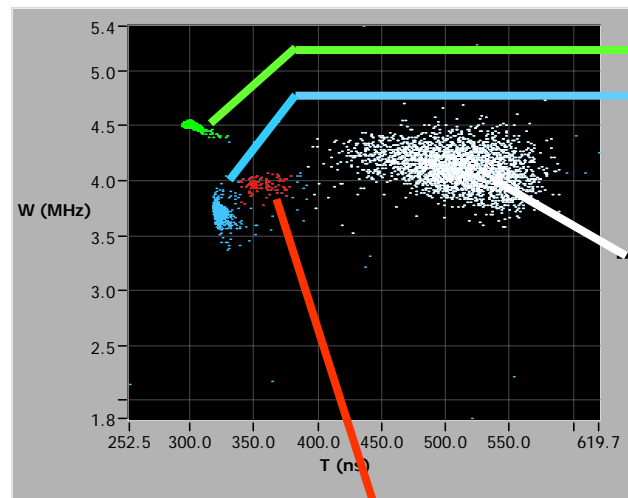
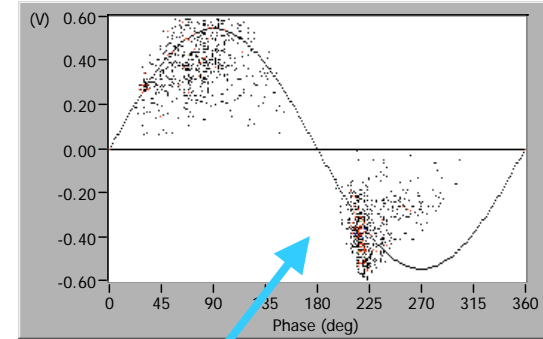
ACQUISIZIONE SU UNA BARRA DI STATORE



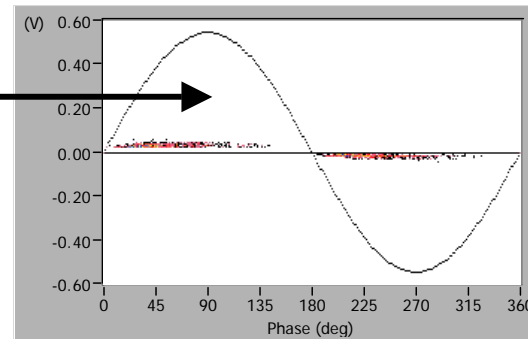
Cavità interna



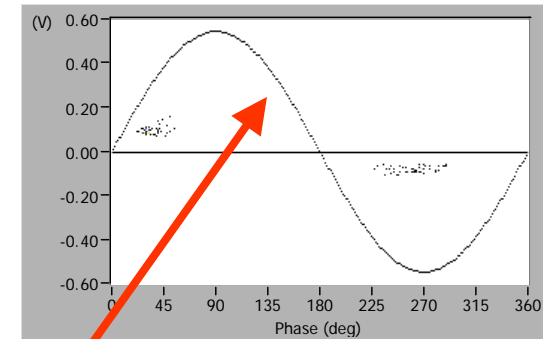
Delaminazione



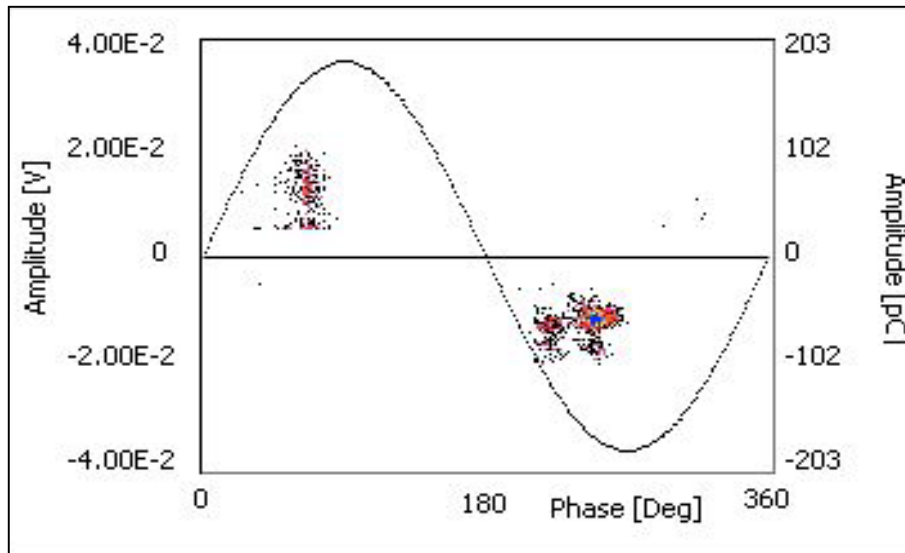
Cavità interna



Microcavità

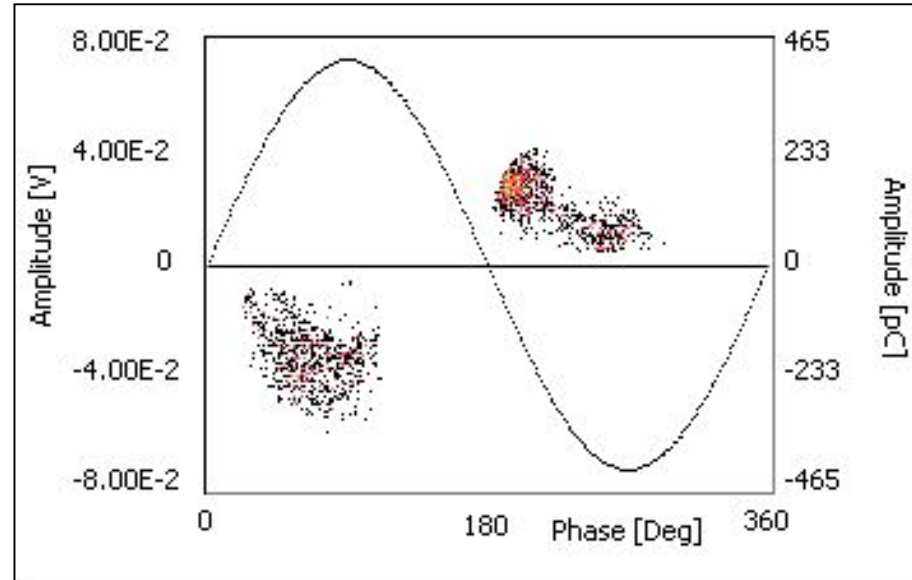


DIFETTI TIPICI DI CAVI E ACCESSORI

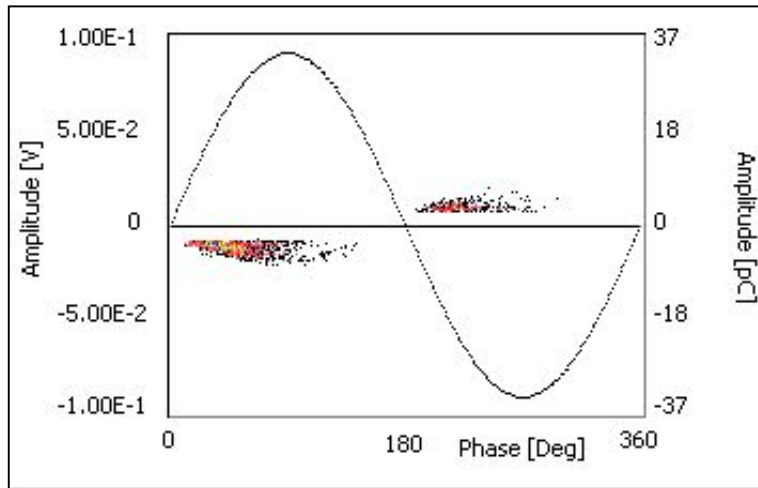


Montaggio errato di giunto HV

Difetto nello schermo
semiconduttivo

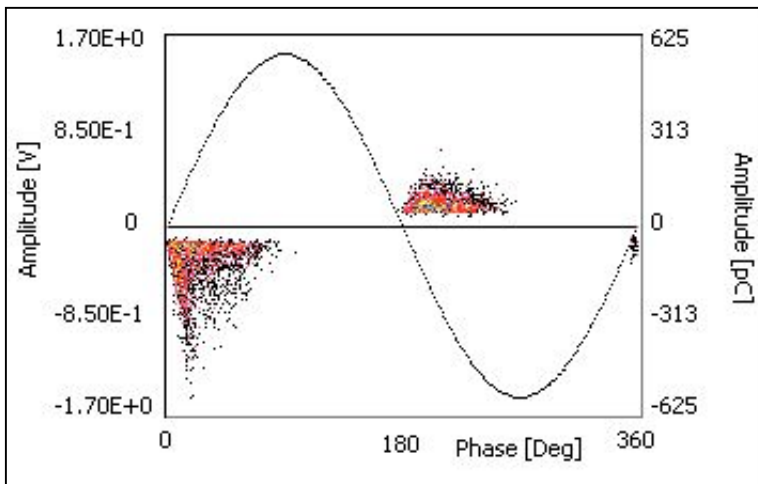
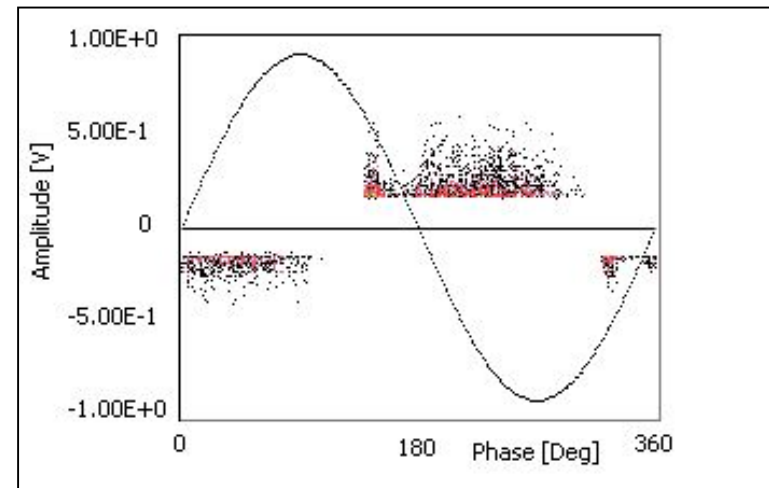


DIFETTI TIPICI DI MACCHINE ROTANTI



Microcavità diffuse

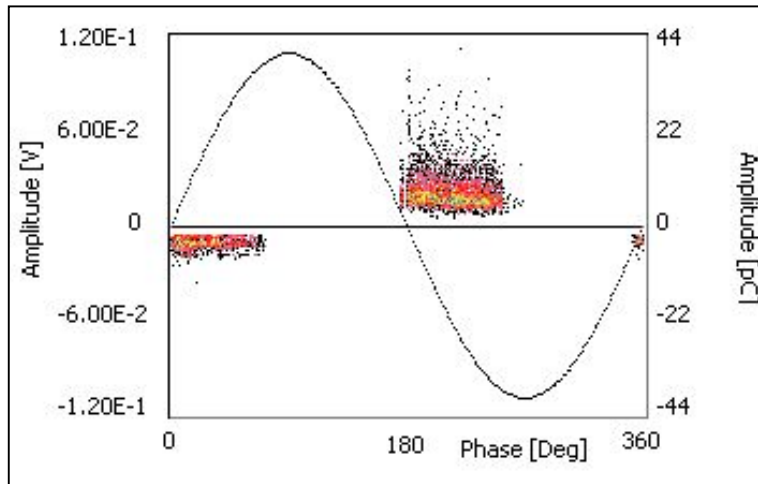
Delaminazione nella mica



Distacco conduttore
isolante lato rame

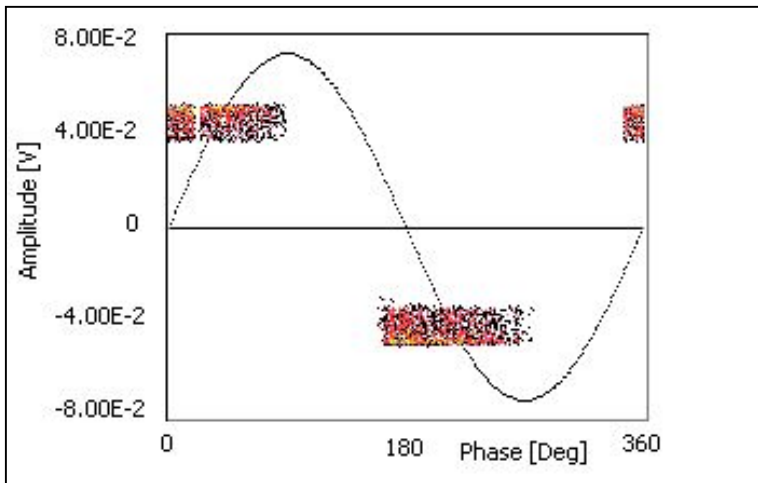
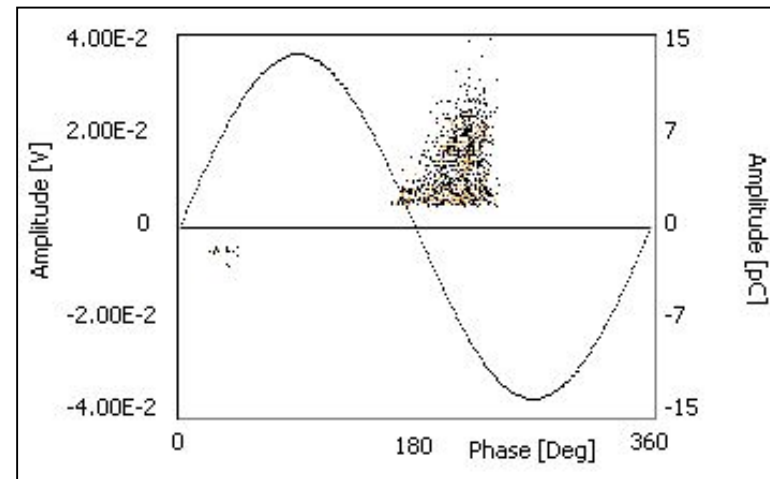
Materiali e Tecnologie Elettriche 2009/10 -X-

DIFETTI TIPICI DI MACCHINE ROTANTI



**Distacco conduttore
isolante lato cava**

**Scariche nelle
gradature anti-corona**



**Scariche fra barre di
fasi differenti**

--

- Fine MTE_10