

Appunti dalle lezioni del corso di

MODELLISTICA ELETTROMAGNETICA DEI MATERIALI

(prof G. Lupò)

CAPITOLO IX

Fenomeni di degrado nei materiali isolanti (BOZZA)

§IX.1 IL COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE DEI MATERIALI ISOLANTI – L'ASSORBIMENTO D'ACQUA

Il dimensionamento di un sistema di isolamento richiede la conoscenza del tipo, della entità e della durata della sollecitazione elettrica nonché quella delle condizioni ambientali di esercizio. D'altra parte per un corretto progetto del sistema occorre conoscere le proprietà a lungo termine del materiale impiegato. Risulta, quindi necessario ricorrere a prove accelerate in condizioni standardizzate che consentano di estrapolare i risultati ottenuti su campioni alle effettive condizioni di esercizio. Inoltre, a causa dei notevoli scarti statistici nelle proprietà dei materiali il dimensionamento deve essere effettuato con opportuni margini di sicurezza.

§IX.10.1 Requisiti per i materiali isolanti

I materiali isolanti devono durante il loro esercizio sopportare sollecitazioni sia di carattere elettrico che meccanico, termico, ecc. Tali stress agiscono spesso simultaneamente, di modo che risultano determinanti gli effetti combinati. Per quanto attiene le proprietà elettriche, in base al tipo di applicazione il peso dei requisiti seguenti può variare da caso a caso:

- alto valore della rigidità dielettrica al fine di contenere dimensioni e quindi costi;
- basse perdite dielettriche per ridurre il riscaldamento del materiale;
- alta resistenza al tracciamento durante gli stress superficiali;
- costante dielettrica appropriata.

Le proprietà meccaniche di maggiore interesse variano a seconda delle applicazioni; in particolare risulteranno interessanti la resistenza agli sforzi di trazione (isolatori sospesi), sforzi di compressione (isolatori di stazione), il modulo elastico, la resistenza all'impatto, ecc.

Le proprietà termiche riguardano la tenuta agli stress termici, la ritenzione della forma, la conducibilità termica, la non infiammabilità.

Risultano ancora importanti le caratteristiche nei confronti degli agenti ambientali, quali la resistenza agli attacchi chimici, alle radiazioni, alla penetrazione di acqua, ecc.

Altre proprietà di interesse sono quelle di carattere tecnologico, quali la facile lavorabilità, l'omogeneità, la stabilità dimensionale.

IX.10.2 INFLUENZA DELL'ASSORBIMENTO D'ACQUA SULLE PROPRIETA' ELETTRICHE DI MATERIALI COMPOSITI ORGANICI PER ISOLAMENTI ELETTRICI

I materiali compositi organici, in paragone agli isolamenti di tipo tradizionale (vetro, porcellana), presentano, accanto agli indubbi vantaggi di peso e ingombro contenuti a parità di livello di tensione, facile lavorabilità, ottime prestazioni meccaniche, un accentuato fenomeno di invecchiamento. Una delle cause che provoca un rapido deterioramento delle proprietà dei materiali compositi organici risulta senz'altro l'assorbimento d'acqua.

L'acqua penetra nel materiale attraverso un processo di diffusione che segue la cosiddetta legge di Fick (caso monodimensionale):

$$D_{eff} \frac{d^2 C_d}{dx^2} = \frac{dC_d}{dt} \quad (\text{VIII.1})$$

dove D_{eff} è il coefficiente di diffusione, C_d la concentrazione di acqua disciolta. Tale equazione tiene conto sia del fatto che l'acqua può essere presente sia in fase libera (ad esempio negli interstizi e vacuoli presenti nel materiale, sia come fase legata (ad esempio in corrispondenza di legami idrofilici). Un meccanismo di tipo fickiano della cinetica di assorbimento d'acqua è riconoscibile dall'andamento dell'incremento percentuale di peso di provini sottoposti ad assorbimento d'acqua. Tale andamento diagrammato in funzione della radice quadrata del tempo presenta un primo tratto lineare seguito da una zona in cui si raggiunge una saturazione, come mostrato nella fig.VIII.1 relativa al caso di resine epossidiche bisfenoliche.

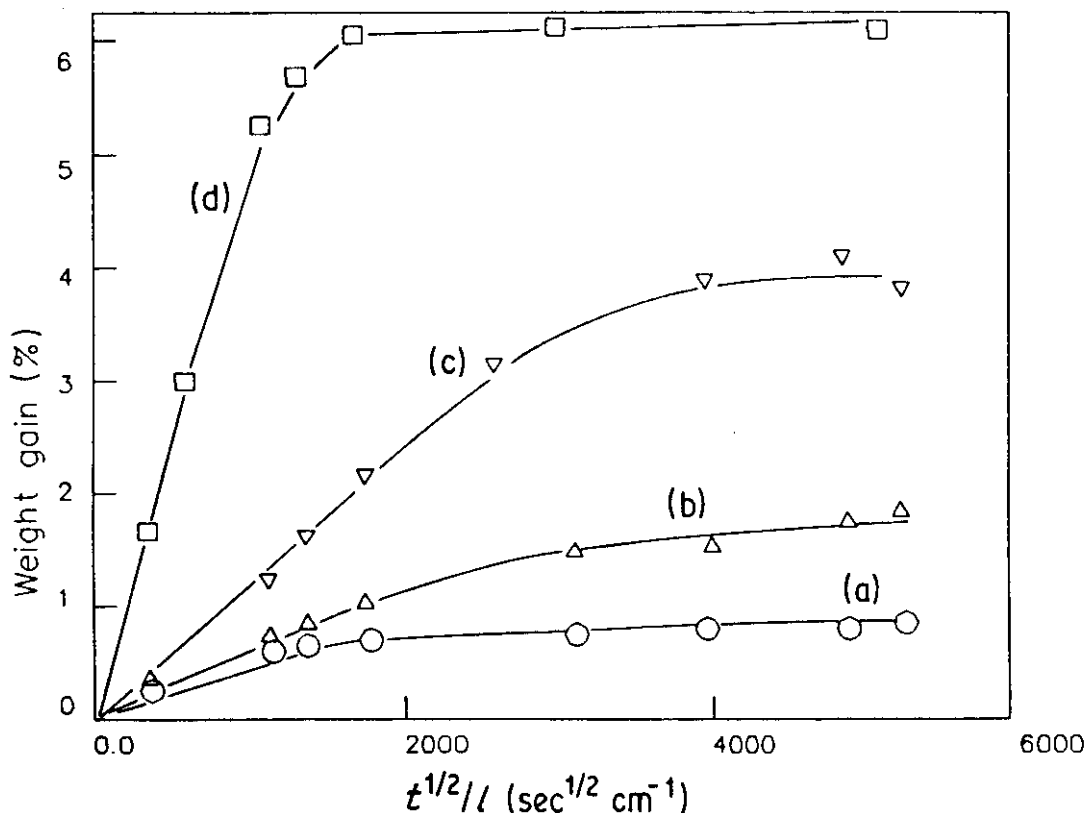


Fig. IX.1: Andamento dell'assorbimento d'acqua per resine epossidiche bisfenoliche a diverse temperature: a) 20° C, b) 40°C, c) 70°C, d) 100°C.

La presenza di acqua modifica il comportamento elettrico e dielettrico del materiale in misura dipendente sia dalle condizioni in cui tale fenomeno si verifica sia dalle proprietà intrinseche del materiale stesso.

Fra i materiali più adoperati nelle applicazioni per medie ed alte tensioni ci sono senz'altro la gomma siliconica (SIR), l'etilene propilene diene monomero (EPDM), e le resine epossidiche cicloalifatiche (CEP - in genere caricate con quarzo o allumina triidrata).

Il confronto fra i valori di equilibrio di acqua assorbita fra SIR e CEP è riportato nelle figure VIII.2 e VIII.3. E' da notare come la temperatura di prova non debba mai superare valori per cui possono subentrare variazioni strutturali del materiale che originano fenomeni anomali (ad es. la curva relativa all'assorbimento a 90°C mostra una flessione che va attribuita alla decomposizione del materiale).

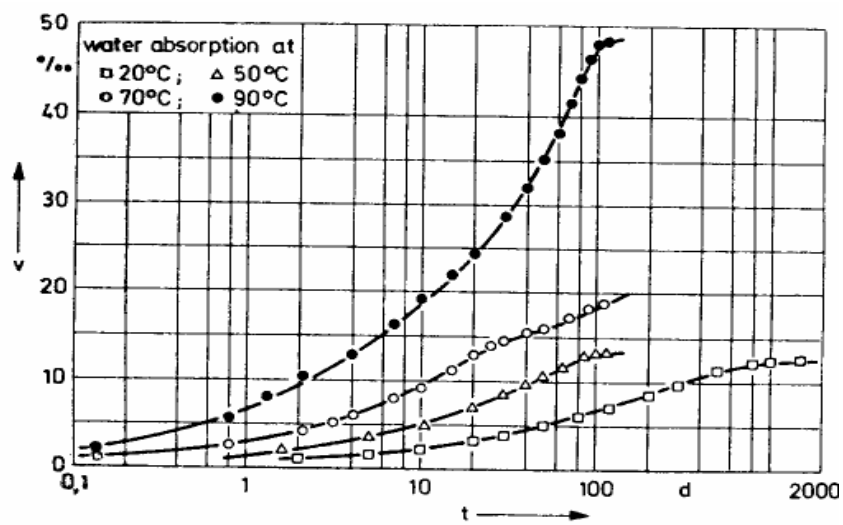


fig.IX.2 Assorbimento d'acqua da CEP

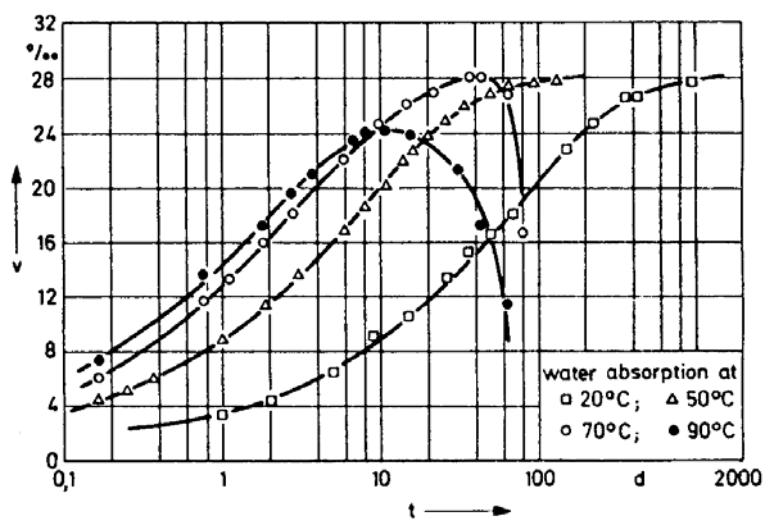


fig. IX.3 assorbimento d'acqua da SIR

A dispetto di una maggiore quantità di acqua assorbita da parte del SIR rispetto al CEP, i valori delle proprietà dielettriche di interesse ($\tan \delta$ ed ϵ_r) subiscono variazioni più contenute. Il $\tan \delta$ del SIR in condizioni di saturazione raggiunge valori piuttosto alti (prossimi a 0.2) ma stabili. Nel caso del CEP, invece, si possono mettere in evidenza due zone: ad un primo tratto relativo ad assorbimenti dell'ordine di .8% in cui non si notano apprezzabili variazioni, fa seguito una zona in cui si nota un continuo aumento del $\tan d$. Tali risultati sono presentati nelle figure 4 e 5 per SIR e CEP rispettivamente. I dati si riferiscono a misure a frequenza industriale.

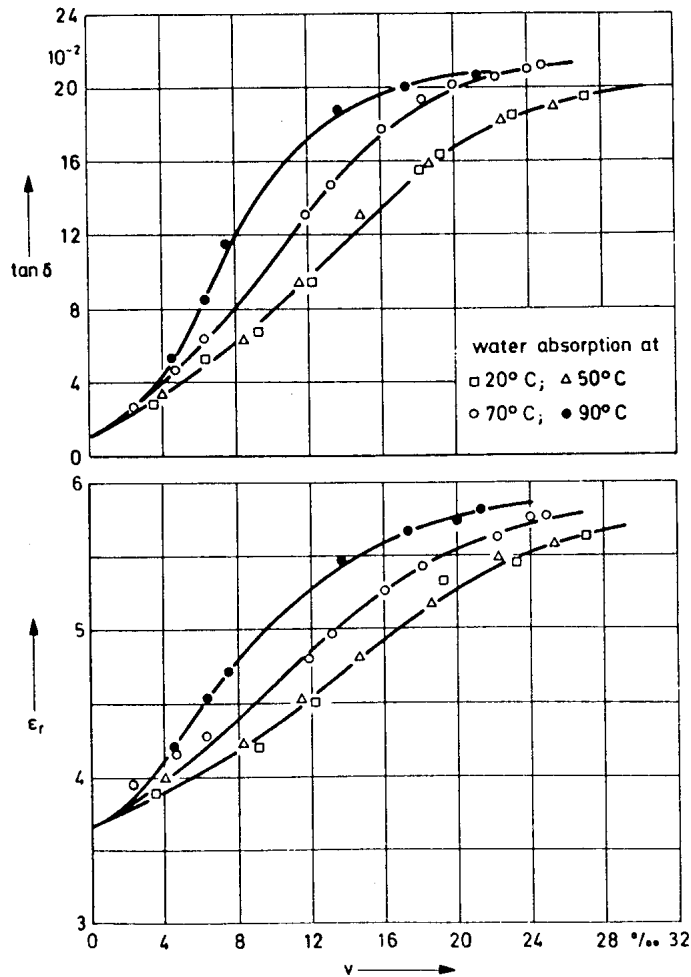


Fig. Loss tangent and permittivity of SIR versus the water absorption

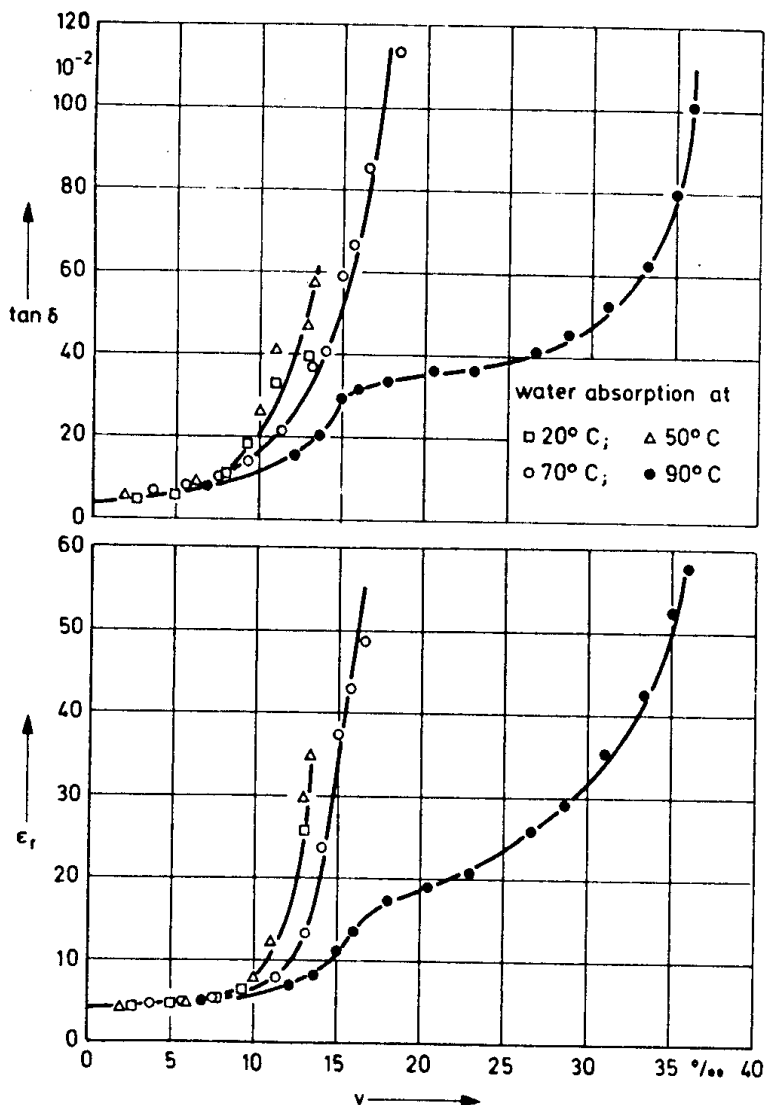


Fig. 8: Influence of water absorption on loss tangent and permittivity of CEP

Il miglior comportamento del SIR è stato spiegato in relazione alle migliori caratteristiche idrofobiche di questo materiale rispetto al CEP. Infatti, si è osservato che, nel caso del SIR, si ha una migrazione di gruppi di elastomero dall'interno verso l'esterno del materiale che portano alla formazione sulla superficie dell'isolatore polluto di un sottile strato di silicio che in pratica protegge l'isolatore nei confronti di ulteriori fenomeni di assorbimento d'acqua. Tale aspetto favorevole è mostrato dalla capacità mostrata dal SIR di riacquistare gli stessi valori dell'angolo di contatto dopo sollecitazioni accelerate

in camera a nebbia. L'angolo di contatto (vedi fig. 6) è un parametro che caratterizza la proprietà di idrorepellenza di un materiale. Maggiore risulta il valore dell'angolo di contatto nella direzione del moto della gocciolina di acqua, minore risulta la bagnabilità.

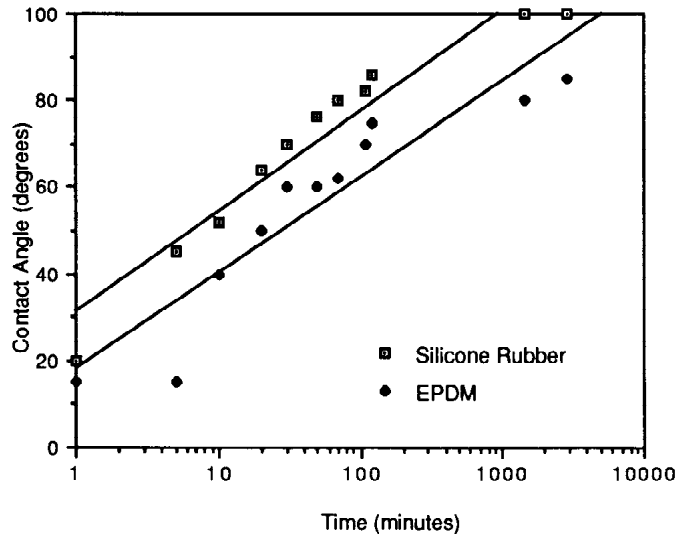


Fig. : Recovery of the contact angle with time for silicone rubber and EPDM after their surfaces were wettable due to fog chamber exposure.

Miglioramenti nelle prestazioni del CEP possono essere ottenuti attraverso la aggiunta alla formulazione del materiale di piccole quantità di agenti idrofobici. La figura 7 mostra, infatti come l'introduzione di una quantità crescente (1x, ...,4x) di agente idrofobico porti ad un miglioramento delle proprietà elettriche del sistema CEP, sebbene, in maniera abbastanza strana, sia anche evidente un aumento della quantità di acqua assorbita all'aumentare dell'agente idrofobico.

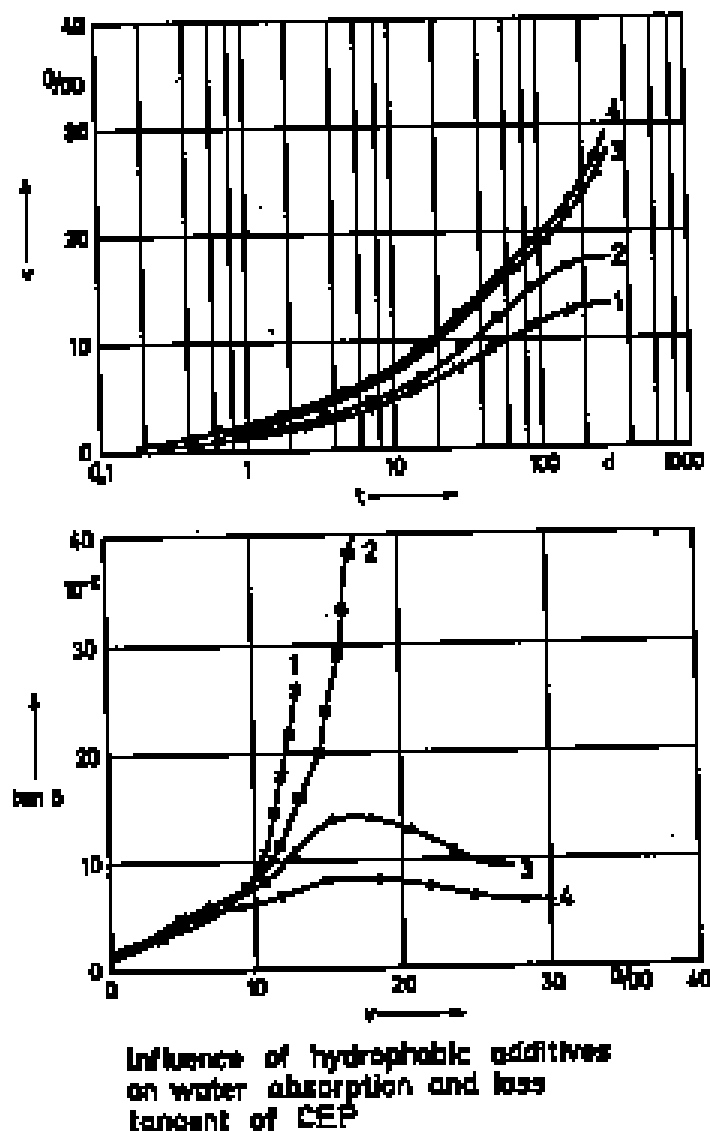
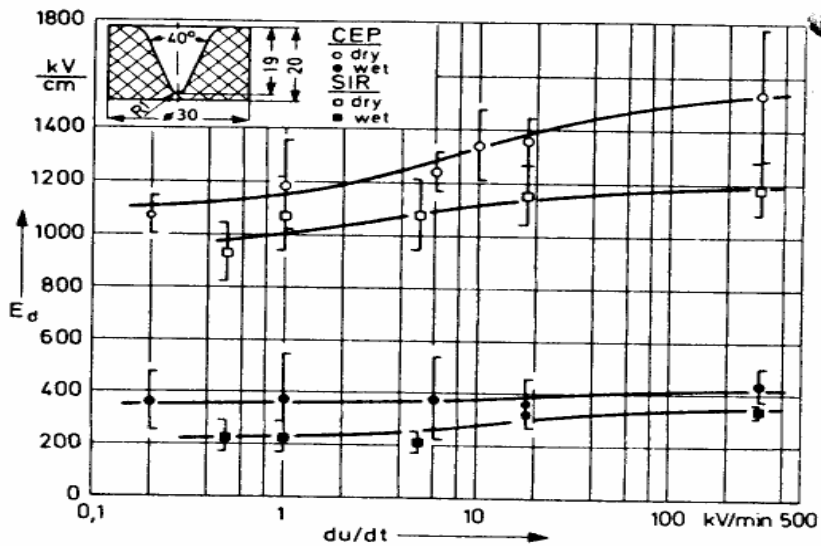


fig. 7

Le variazioni delle proprietà dielettriche sono da attribuire comunque per entrambi i materiali essenzialmente a fenomeni di polarizzazione interfacciale che, da quanto messo in luce dalle figure precedenti, risulta più gravosa nel caso del CEP. In particolare, per questo sistema è stato anche messo in evidenza il ruolo della carica minerale sui fenomeni di polarizzazione interfacciale. Si è notato che il comportamento dei materiali caricati con quarzo silanizzato (la cui superficie è trattata in modo da aumentare il grado di adesione alla matrice polimerica) risulta migliore di quello in cui il filler risulta allumina triidrata.

Nella figura 8 è riportato l'andamento della tensione di puntura al variare del dv/dt della sollecitazione per SIR e CEP sia in condizioni asciutte che in seguito ad assorbimento d'acqua. Si nota come la tensione di breakdown risulti per entrambi i materiali sottoposti all'assorbimento d'acqua ridotta di circa il 20% rispetto al valore del materiale di riferimento. E' da notare comunque che gli stress a cui sono sottoposti tali materiali in applicazioni all'aperto non superano mai i 20 kV/cm mentre si può notare come i valori che si ottengono sono almeno un ordine di grandezza maggiore.



Bibliografia

F. Barozzi, F. Gasparini, Fondamenti di Elettrotecnica - Elettromagnetismo, ed. UTET, Torino, 1989

P. Robert – Matériaux de l'Electrotechnique (vol. II della collana *Traité d'Electricité – Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne* – curata da J. Neiryneck) – Edition Georgi – St. Saphorin (CH) -1979

F. Bertein et al. – L'Electricité et la matière (vol. III della collana *Traité d'Electricité* curata da G. Goudet) – Masson - Paris- 1975

L. Solymar – D. Walsh – Lectures on the Electrical Properties of Materials – Oxford Science publ. – IV Ed. 1988

H. Wayne Beaty (ed.) – Electrical Engineering Materials Reference Guide – McGraw-Hill 1990

D. D. Pollock – Electrical conduction in solids – An Introduction, ASM- Ohio –1985

L.L. Alston – High Voltage Technology – Oxford University Press 1968

N. Mott – Conduction in non-crystalline Materials – Oxford Science Publications –1987

J.R. Ferraro – J.M. Williams – Introduction to synthetic electrical conductors – Academic Press 1987

H. Frohlich – Theory of Dielectrics - Oxford Science Publ. 1958