



ANISOTROPIA DIELETTRICA E IL CASO DEL LEGNO DI TESTA: ORIENTAMENTO DEL PERCORSO DI CARICO CAPACITIVO NEI SUPPORTI LIGNEI MAGNETICAMENTE NEUTRI PER CAVI



Anisotropia dielettrica e il caso del legno di testa: orientamento del percorso di carico capacitivo nei supporti lignei magneticamente neutri per cavi

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstract

Un supporto ligneo per cavi è un corpo dielettrico mantenuto nel campo vicino di un conduttore di segnale e il suo contributo all'installazione è quindi una capacità distribuita, dipendente dall'orientamento e posta in parallelo al cavo. Nello studio principale sul grado di neutralità del legname (Bosque, Ferro, Park e Tanaka, 2026), l'orientamento della fibra è stato identificato come variabile di progetto e la lavorazione con il legno di testa in verticale è stata adottata sulla base di un argomento meccanico e dielettrico combinato, esposto in una sola sezione. Questo articolo complementare sviluppa per intero tale argomento. Il legno è dielettricamente anisotropo: sia la permittività relativa ϵ_{s_r} sia la tangente di perdita $\tan \delta$ sono maggiori lungo la fibra che trasversalmente, e l'asse longitudinale supera i due assi trasversali perché la geometria tubolare delle tracheidi e dei vasi e i dipoli dell'acqua legata che dominano la polarizzazione sono allineati con la fibra. Riportiamo misure mediante analizzatore d'impedenza e piastre parallele con anello di guardia di ϵ_{s_r} e $\tan \delta$ sul teak equatoriale lungo tutti e tre gli assi anatomici (longitudinale L, radiale R, tangenziale T), a contenuti di umidità dell'8, 12 e 16 percento e da 20 Hz a 10 MHz, confermando alle frequenze audio e al 12 percento di umidità un rapporto di anisotropia $\epsilon_{s_L} / \epsilon_{s_T}$ compreso tra 1,24 e 1,31. Da queste costanti costruiamo un modello a capacità distribuita di un cavo appoggiato in una culla lavorata sopra una colonna di legno e calcoliamo il contributo capacitivo per blocco per la lavorazione con legno di testa in verticale e per quella con legno di filo: i due orientamenti differiscono di un margine misurabile, e il legno di testa presenta la minore capacità riferita al cavo perché colloca gli assi trasversali a bassa permittività nel piano orizzontale, dove il campo del cavo è più intenso, e riserva l'asse longitudinale ad alta permittività al percorso di carico verticale, dove è elettricamente innocuo e meccanicamente ideale. Una scansione dell'angolo della fibra individua il minimo di accoppiamento in corrispondenza del vero legno di testa. Concludiamo osservando che il legno di testa era stato specificato in origine per la rigidità a compressione e che l'argomento dielettrico, sviluppato indipendentemente e in seguito, concorda con quello meccanico al punto da confermarlo.

1. INTRODUZIONE

Un supporto per cavi non trasporta il segnale. Gli rimane accanto. È precisamente per questo che il suo ruolo elettrico viene liquidato con tanta facilità: un blocco di legno sotto un cavo non fa manifestamente parte del circuito, ed è allettante concludere che la sua composizione, la sua fibra e il suo orientamento siano materia per l'ebanista, non per l'ingegnere. L'articolo principale sul grado di neutralità (Bosque, Ferro, Park e Tanaka, 2026) ha esposto la metà magnetica dell'argomento -- un supporto in contatto continuo con un conduttore fa parte dell'ambiente di campo vicino del conduttore, e il suo contenuto paramagnetico residuo è un dato misurabile dell'installazione anziché un elemento decorativo. La metà dielettrica è stata trattata in una sola sezione. Questo articolo è quella sezione, estesa alla lunghezza che la fisica merita.

Il fatto elettrico che il blocco si trovi accanto al cavo anziché al suo interno non lo rimuove dal circuito; stabilisce il modo in cui vi si accoppia. Un corpo dielettrico nel campo di un conduttore immagazzina energia per via capacitiva, e una capacità distribuita in parallelo a una linea di trasmissione costituisce un carico, piccolo ma reale, la cui entità dipende dalla permittività del corpo e da come essa è orientata rispetto al campo. Il legno non è un dielettrico isotropo. La sua permittività dipende dalla direzione, e un supporto ligneo presenta quindi non uno, ma tre contributi dielettrici, selezionabili al banco di lavorazione mediante l'angolo con cui viene tagliato il massello.

L'affermazione di questo articolo è circoscritta e quantitativa. Sosteniamo che l'orientamento con il legno di testa in verticale specificato per l'Equatorial Elevation Block -- anelli di accrescimento sulla faccia superiore, fibre disposte verticalmente lungo il percorso di carico -- è quello che minimizza la capacità del blocco riferita al cavo, che il minimo è misurabile anziché puramente teorico e che coincide con l'orientamento già scelto per ragioni meccaniche. Non sosteniamo che l'effetto sia grande. Sosteniamo che possiede un segno, un'entità e una direzione preferenziale e che un produttore che lavora il blocco nell'altro verso per ottenere un legno di filo più gradevole ha spostato il valore nella direzione sbagliata senza sapere che il valore esiste.

2. L'ANISOTROPIA DIELETTRICA DEL LEGNO

Il legno è un solido cellulare formato da cellule lunghe, cave e allineate assialmente -- tracheidi nei legni teneri, fibre e vasi nei legni duri come il teak -- il cui asse maggiore definisce la fibra. Questa geometria è all'origine dell'anisotropia meccanica nota a ogni falegname ed è ugualmente all'origine di un'anisotropia dielettrica meno conosciuta ma altrettanto reale e documentata da tempo (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Tre meccanismi rendono la permittività dipendente dalla direzione e tutti e tre favoriscono l'asse longitudinale. Primo, le pareti cellulari formano percorsi polarizzabili continui lungo la fibra e interrotti attraverso di essa, per cui la polarizzazione interfacciale (Maxwell-Wagner) ai numerosi confini parete-lume si accumula preferenzialmente lungo la fibra. Secondo, l'acqua legata trattenuta nelle pareti cellulari -- il contributo dominante alla permittività del legno salvo negli stati più secchi -- si trova in un ambiente i cui siti



ossidrilici e la cui impalcatura microfibrillare sono a loro volta allineati con la fibra, per cui la polarizzazione orientazionale dei dipoli dell'acqua legata è più agevole lungo la fibra che attraverso di essa. Terzo, le due direzioni trasversali, radiale R e tangenziale T, differiscono soltanto lievemente tra loro e rimangono entrambe ben al di sotto del valore longitudinale L. Il risultato, coerente in tutta la letteratura, è l'ordinamento $\epsilon_{L} > \epsilon_{R} \sim \epsilon_{T}$, con lo stesso ordinamento nella tangente di perdita, e un rapporto di anisotropia $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$ generalmente compreso tra 1,2 e 1,5 per i legni duri temperati e tropicali nell'intervallo igroscopico.

I valori assoluti sono modesti e dominati dall'umidità. Il legno anidro si colloca vicino a $\epsilon_r = 2-3$ e cresce rapidamente e monotonicamente con l'aumento del contenuto di umidità, perché ogni incremento di acqua legata aggiunge dipoli all'insieme polarizzabile. Tale rapidità è il motivo per cui il contenuto di umidità, non la specie, rappresenta la leva maggiore sul contributo dielettrico di un supporto, ed è trattato nella Sezione 5. Per l'argomento dell'anisotropia, il punto essenziale è strutturale anziché numerico: la direzione di massima permittività è quella della fibra, e tale direzione viene fissata dal falegname, non dall'albero.

3. MISURAZIONE: PERMITTIVITÀ E PERDITA LUNGO TRE ASSI

Abbiamo misurato ϵ_r e $\tan \delta$ su provini di teak lavorati lungo ciascuno dei tre assi anatomici, in modo che il campo applicato dalla cella a piastre parallele attraversasse a turno il campione longitudinalmente, radialmente e tangenzialmente. I provini erano quadrati, con lato di 40 mm e spessore di 3,0 mm, spianati e paralleli entro ± 10 micrometri e ricavati da tre masselli equatoriali classificati 5N e selezionati secondo il protocollo principale, affinché la contaminazione magnetica non potesse interferire con la lettura dielettrica. Ogni serie di provini è stata condizionata all'equilibrio a tre contenuti di umidità -- 8, 12 e 16 percento -- in camere climatiche, e al termine della prova l'umidità è stata verificata gravimetricamente rispetto alla massa anidra.

La cella era un dispositivo a piastre parallele con anello di guardia del tipo descritto in precedenza (Tanaka e Park, 2022), pilotato da un analizzatore d'impedenza Keysight E4990A da 20 Hz a 10 MHz. L'anello di guardia sopprime gli effetti di bordo, così la capacità misurata corrisponde a un'area definita degli elettrodi e la permittività estratta è il valore volumico del materiale anziché una stima contaminata ai bordi; la tangente di perdita viene letta direttamente come fattore di dissipazione del dispositivo. Il contatto è stato realizzato tramite sottili interstrati di elastomero conduttivo, per compensare la rugosità superficiale residua delle facce lavorate senza usare un adesivo che avrebbe introdotto una propria polarizzazione.

Al 12 percento di umidità e a 1 kHz, il teak ha restituito $\epsilon_L = 2,64$, $\epsilon_R = 2,09$ ed $\epsilon_T = 2,02$, con un rapporto di anisotropia ϵ_L / ϵ_T di 1,31 ed ϵ_L / ϵ_R di 1,26; i due assi trasversali concordavano entro il 4 percento, come previsto. La tangente di perdita seguiva lo stesso ordinamento: $\tan \delta$ era 0,021 lungo la fibra e 0,014-0,015 trasversalmente. Nella banda audio da 20 Hz a 20 kHz le permittività rimanevano costanti entro il 3 percento e il rapporto di anisotropia si manteneva tra 1,24 e 1,31. Portando il contenuto di umidità al 16 percento, ogni valore aumentava -- ϵ_L raggiungeva 3,08 -- e, fatto significativo, l'anisotropia si ampliava leggermente, perché l'acqua legata aggiunta si polarizza preferenzialmente lungo l'asse favorito. L'essiccazione all'8 percento riduceva sia i valori assoluti sia il rapporto. L'anisotropia non è dunque una costante fissa del materiale, ma una grandezza modulata dall'umidità, massima quando è meno desiderabile (legno umido) e minima quando il materiale è più secco; alla specifica di consegna del 12 $\pm$ 1 percento è nettamente risolta e stabile.

4. IL MODELLO DI CAPACITÀ DISTRIBUITA DI CULLA, CAVO E COLONNA

Per trasformare tre permittività in una decisione di progetto serve la geometria dell'accoppiamento. Il cavo non poggia su un blocco piano; si appoggia in una culla, una scanalatura poco profonda e raggiata ricavata nella faccia superiore, così un arco finito della guaina del cavo è separato dal legno soltanto dallo spessore della parete della guaina. Il legno direttamente sotto tale arco -- una breve colonna verticale che corre dal fondo della culla nel corpo del blocco -- è il punto in cui il campo tra il conduttore e qualsiasi ritorno a terra distante è più intenso e in cui si immagazzina la grande maggioranza della capacità tra cavo e supporto. Il legno più lontano lateralmente e in profondità contribuisce con un peso che diminuisce rapidamente mentre il campo si allarga e si indebolisce.

Modelliamo il sistema come una capacità distribuita per unità di lunghezza del percorso, integrando l'energia di campo locale nel volume di legno sotto e intorno alla culla e inserendo asse per asse il tensore di permittività del legno. La costruzione è quella standard per un dielettrico anisotropo: la componente verticale del campo campiona la permittività dell'asse verticale, le componenti orizzontali campionano le permittività degli assi orizzontali e, poiché la culla concentra il campo nella regione quasi verticale subito sotto il conduttore mentre i percorsi di ritorno che chiudono la capacità si estendono verso l'esterno e verso il basso attraverso i fianchi della colonna, le permittività orizzontali rappresentano la quota maggiore dell'energia immagazzinata. Il risultato del modello è un unico valore di interesse ingegneristico: la capacità aggiunta dal blocco al cavo, in picofarad per blocco, in funzione dell'orientamento del tensore di permittività.

Due orientamenti sono di interesse pratico. La lavorazione con legno di testa in verticale dispone verticalmente l'asse longitudinale L, lungo il percorso di carico, e lascia i due assi trasversali a bassa permittività R e T nel piano orizzontale. La lavorazione con legno di filo (taglio tangenziale, fibre orizzontali) adagia l'asse longitudinale L nel piano orizzontale, dove viene campionato dalle intense componenti orizzontali del campo, e dispone verticalmente uno degli assi trasversali. Inserendo nel modello le costanti misurate al 12 percento per una geometria rappresentativa della culla -- diametro del cavo di 12 mm, culla raggiata di 3 mm, altezza del blocco di 60 mm, ritorno nominale a terra alla distanza del telaio -- si ottengono circa 1,9 pF per blocco con l'orientamento di



testa e circa 2,3 pF per blocco con l'orientamento di filo: una differenza prossima a 0,4 pF, circa il 18 percento, dovuta esclusivamente all'angolo di taglio. Per un singolo blocco è piccola. È anche reale, ripetibile, di segno univoco e gratuita: al produttore costa soltanto la decisione di orientare correttamente il massello e si accumula sui diversi blocchi di un percorso completo.

5. SCANSIONE DELL'ANGOLO DELLA FIBRA E SENSIBILITÀ ALL'UMIDITÀ

I due orientamenti citati sono gli estremi di un continuo, e vale la pena confermare che il legno di testa costituisca un vero minimo anziché soltanto la migliore tra due scelte arbitrarie. Abbiamo lavorato una serie di provini con angoli della fibra compresi tra 0 deg (fibra verticale, vero legno di testa), passando per 30, 45 e 60, fino a 90 deg (fibra orizzontale, legno di filo) rispetto all'asse di carico, e misurato ciascuno nella geometria del modello della culla con un conduttore alimentato al di sopra. La capacità riferita al cavo aumentava monotonicamente con l'angolo della fibra, dal minimo del legno di testa a 0 deg fino al massimo del legno di filo a 90 deg, seguendo da vicino la ponderazione per il quadrato del coseno prevista dal modello tensoriale mentre l'asse longitudinale ad alta permittività ruota progressivamente nel campo orizzontale. La curva è poco inclinata vicino a 0 deg -- pochi gradi di errore nella lavorazione costano quasi nulla -- e raggiunge la pendenza massima nella parte centrale della scansione, per cui la penalità di un taglio realmente trascurato è maggiore di quella di un taglio imperfetto ma ben intenzionato. Il minimo si trova sul vero legno di testa ed è un minimo, non un flesso.

Il contenuto di umidità sposta verticalmente l'intera curva senza modificare la posizione del minimo. Poiché la permittività aumenta rapidamente con l'acqua legata, un blocco passato dal 12 al 16 percento di umidità aggiunge in termini assoluti più capacità dell'intera differenza tra legno di testa e legno di filo a umidità costante -- la leva dell'umidità è maggiore di quella dell'orientamento. I due fattori sono però indipendenti: bagnare il legno innalza il livello minimo, non cambia quale orientamento sia più basso. Orientamento e condizionamento sono dunque controlli complementari e devono essere esercitati entrambi. È questa la base misurata per essiccare in forno ogni massello classificato all'origine fino al 12 +/- 1 percento e per il controllo annuale dell'umidità nel programma di manutenzione: l'orientamento è fissato permanentemente dalla lavorazione e non può variare, mentre può variare l'umidità che ne scala l'effetto, e un supporto lasciato equilibrare in una stanza umida cede lentamente il margine garantito dal banco di lavorazione.

Osserviamo incidentalmente che l'accordo tra gli assi trasversali misurato nella Sezione 3 rende irrilevante, entro l'incertezza di misura, la scelta tra la disposizione radiale e quella tangenziale nel piano orizzontale; il blocco può essere ruotato intorno al proprio asse verticale per ottenere il miglior aspetto degli anelli sulla faccia superiore senza conseguenze dielettriche, purché le fibre rimangano verticali.

6. DISCUSSIONE: DUE ARGOMENTI, UN ORIENTAMENTO

L'orientamento di testa non è stato adottato per il suo comportamento dielettrico. È stato adottato perché il legno di testa è la disposizione più rigida e resistente per caricare il legno in compressione: con le fibre verticali, il carico verso il basso viene sostenuto lungo le cellule tubolari nella loro direzione più resistente, e il blocco sopporta il peso statico di un percorso di cavi e l'assestamento dell'installazione con il minimo scorrimento viscoso e la minima variazione dimensionale. È un principio antico e indiscusso dell'ingegneria del legname, e ha fissato la specifica di lavorazione prima che venisse misurata qualsiasi permittività.

Le misure dielettriche qui riportate sono state effettuate in seguito e, in linea di principio, avrebbero potuto contraddire la scelta meccanica -- l'asse longitudinale avrebbe potuto essere quello a bassa permittività, nel qual caso disporlo verticalmente sarebbe stato meccanicamente corretto ed elettricamente errato, imponendo un compromesso. Non l'hanno contraddetta. L'asse longitudinale è quello ad alta permittività, per cui disporlo verticalmente lo rimuove dal piano orizzontale, dove il campo del cavo è più intenso, esattamente come richiede il modello della capacità. L'orientamento meccanicamente ideale è, in modo indipendente, anche quello dielettricamente più silenzioso. I due argomenti sono stati costruiti a partire da principi fisici diversi, in tempi diversi, da persone impegnate a risolvere problemi diversi, e selezionano lo stesso taglio.

Non attribuiamo alcun peso mistico a tale concordanza; nei materiali anisotropi l'asse rigido e quello ad alta permittività sono spesso allineati, perché entrambe le proprietà risalgono alla stessa microstruttura allineata, e il teak è uno di questi materiali. La conseguenza pratica rimane tuttavia valida. Un produttore che segua soltanto l'argomento meccanico arriva al legno di testa e, senza volerlo, minimizza anche l'accoppiamento capacitivo. Un produttore che ignori l'argomento meccanico per ottenere un legno di filo decorativo perde su entrambi i fronti nello stesso momento. La convergenza non è tanto una coincidenza di cui meravigliarsi, quanto una ragione per fidarsi della specifica: quando due linee di ragionamento indipendenti terminano sullo stesso valore, è più probabile che il valore sia corretto.

7. CONCLUSIONE

Il legno è un corpo dielettricamente anisotropo e un supporto ligneo per cavi è tale corpo mantenuto nel campo vicino di un conduttore. Il suo contributo all'installazione è una piccola capacità distribuita, la cui entità viene fissata dal produttore, consapevolmente o meno, al banco di lavorazione. Abbiamo misurato la permittività e la perdita sui tre assi del teak equatoriale, confermato l'ordinamento previsto $\epsilon_{L} > \epsilon_{R} \sim \epsilon_{T}$ con un rapporto di anisotropia prossimo a 1,3 al contenuto di umidità di



consegna e trasferito tali costanti in un modello di capacità della culla e della colonna fino a ottenere un indice -- picofarad per blocco -- che differisce in modo misurabile tra la lavorazione con legno di testa e quella con legno di filo. Il legno di testa fornisce il valore inferiore, di circa 0,4 pF e del 18 percento in una geometria rappresentativa, e una scansione dell'angolo della fibra lo conferma come vero minimo.

Il margine per blocco è piccolo e non intendiamo sovrastimarne. Affermiamo soltanto che è reale, che presenta una direzione preferenziale e che tale direzione coincide con quella già specificata per ragioni meccaniche. L'Equatorial Elevation Block viene lavorato con il legno di testa in verticale perché questa è la disposizione più rigida per sostenere un carico di compressione; l'analisi dielettrica qui riportata è stata condotta in seguito e conferma che lo stesso taglio è anche quello dielettricamente più silenzioso. Ogni blocco viene fornito con il legno di testa rivolto verso l'alto, essiccato in forno al 12 +/- 1 percento, senza finitura, con il grado e le costanti misurate riportati sul certificato. Invitiamo il lettore a chiedere a qualsiasi altro produttore di supporti lignei in quale direzione corra la fibra e perché.

RIFERIMENTI

- [1] James, W. L. (1975). Proprietà dielettriche del legno e dei pannelli duri: variazione con temperatura, frequenza, contenuto di umidità e orientamento della fibra. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Proprietà dielettriche del legno e dei materiali a base di legno. Springer-Verlag, Berlino.
- [3] Skaar, C. (1988). Relazioni fra legno e acqua. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlino.
- [4] Norimoto, M. (1976). Proprietà dielettriche del legno. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Classificazione del grado di neutralità magnetica del legname strutturale: una classificazione di purezza a gradi N per materiali di supporto audio. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Misurazione della permittività a piastre parallele con anello di guardia su solidi anisotropi a bassa perdita. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.