



ANISOTROPIA DIELÉTRICA E A DEFESA DO TOPO DO VEIO: ORIENTAÇÃO DO CAMINHO DE CARGA CAPACITIVO EM SUPORTES DE CABO DE MADEIRA MAGNETICAMENTE NEUTRA



Anisotropia dielétrica e a defesa do topo do veio: orientação do caminho de carga capacitivo em suportes de cabo de madeira magneticamente neutra

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.

Resumo

Um suporte de cabo de madeira é um corpo dielétrico mantido no campo próximo de um condutor de sinal; portanto, sua contribuição à instalação é uma capacitância distribuída, dependente da orientação e em paralelo com o cabo. No tratamento principal da classificação de neutralidade da madeira (Bosque, Ferro, Park e Tanaka, 2026), a orientação da fibra foi identificada como variável de projeto e a fresagem com o topo do veio na vertical foi adotada com base em um argumento mecânico e dielétrico combinado, exposto em uma única seção. Este artigo complementar desenvolve esse argumento por inteiro. A madeira é dielectricamente anisotrópica: tanto a permissividade relativa ϵ_r quanto a tangente de perdas $\tan \delta$ são maiores ao longo da fibra do que transversalmente; o eixo longitudinal supera os dois eixos transversais porque a geometria tubular das traqueídes e vasos e os dipolos de água ligada que dominam a polarização estão alinhados à fibra. Relatamos medições com analisador de impedância e placas paralelas com anel de guarda de ϵ_r e $\tan \delta$ para teca equatorial ao longo dos três eixos anatômicos (longitudinal L, radial R, tangencial T), a 8, 12 e 16% de teor de umidade, de 20 Hz a 10 MHz, confirmando razão de anisotropia $\epsilon_r L / \epsilon_r T$ de 1.24-1.31 nas frequências de áudio e a 12% de umidade. A partir dessas constantes, construímos um modelo de capacitância distribuída de um cabo apoiado em um berço usinado acima de uma coluna de madeira e calculamos a contribuição capacitiva por bloco para topo do veio na vertical em comparação com a face longitudinal: as duas orientações diferem por margem mensurável, com o topo apresentando menor capacitância referida ao cabo porque coloca os eixos transversais de baixa permissividade no plano horizontal onde o campo do cabo é mais intenso e reserva o eixo longitudinal de alta permissividade para o caminho de carga vertical, onde é eletricamente inofensivo e mecanicamente ideal. Uma varredura do ângulo da fibra localiza o mínimo de acoplamento no verdadeiro topo do veio. Encerramos observando que o topo do veio foi originalmente especificado por rigidez à compressão e que o argumento dielétrico, alcançado de forma independente e posterior, concorda com o mecânico a ponto de confirmá-lo.

1. INTRODUÇÃO

Um suporte de cabo não transporta o sinal. Ele fica ao lado. É precisamente por isso que seu papel elétrico é descartado com tanta facilidade: um bloco de madeira sob um cabo claramente não está no circuito, e é tentador concluir que sua composição, fibra e orientação são assuntos para o marceneiro, não para o engenheiro. O artigo principal sobre classificação de neutralidade (Bosque, Ferro, Park e Tanaka, 2026) apresentou a metade magnética do argumento -- um suporte em contato contínuo com um condutor faz parte do ambiente de campo próximo desse condutor, e seu conteúdo paramagnético residual é um parâmetro mensurável da instalação, não decorativo. Despachou a metade dielétrica em uma única seção. Este artigo é essa seção, ampliada até o comprimento que a física merece.

O fato elétrico de o bloco ficar ao lado do cabo, e não dentro dele, não o remove do circuito; fixa a forma de seu acoplamento. Um corpo dielétrico no campo de um condutor armazena energia capacitivamente, e uma capacitância distribuída em paralelo com uma linha de transmissão é uma carga, pequena mas real, cuja magnitude depende da permissividade do corpo e de como ela é orientada em relação ao campo. A madeira não é um dielétrico isotrópico. Sua permissividade depende da direção, e um suporte de madeira, portanto, não tem uma contribuição dielétrica, mas três, selecionáveis na bancada de usinagem pelo ângulo em que a peça é cortada.

A alegação deste artigo é estreita e quantitativa. A orientação com o topo do veio na vertical especificada para o Equatorial Elevation Block -- anéis de crescimento na face superior, fibras correndo verticalmente pelo caminho de carga -- é a orientação que minimiza a capacitância do bloco referida ao cabo; o mínimo é mensurável, não meramente teórico, e coincide com a orientação já escolhida por razões mecânicas. Não afirmamos que o efeito seja grande. Afirmamos que tem sinal, magnitude e direção preferida, e que um fabricante que frese o bloco no outro sentido em busca de uma face mais bonita moveu o número na direção errada sem saber que o número existe.

2. A ANISOTROPIA DIELÉTRICA DA MADEIRA

A madeira é um sólido celular construído de células longas, ocas e alinhadas axialmente -- traqueídes em coníferas, fibras e vasos em madeiras nobres como a teca -- cujo eixo longo define a fibra. Essa geometria é a origem da anisotropia mecânica conhecida por todo marceneiro, e é igualmente a origem de uma anisotropia dielétrica menos apreciada, mas igualmente real e há muito documentada (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Três mecanismos tornam a permissividade dependente da direção, e todos favorecem o eixo longitudinal. Primeiro, as paredes celulares formam caminhos polarizáveis contínuos ao longo da fibra e interrompidos transversalmente, de modo que a polarização interfacial (Maxwell-Wagner) nos numerosos limites parede-lúmen se acumula preferencialmente ao longo da fibra. Segundo, a água ligada mantida nas paredes celulares -- principal contribuinte para a permissividade da madeira exceto nos estados mais



secos -- ocupa um ambiente cujos sítios de hidroxila e armação microfibrilar estão, eles próprios, alinhados à fibra, por isso a polarização orientacional dos dipolos de água ligada é mais fácil ao longo da fibra do que transversalmente. Terceiro, as duas direções transversais, radial R e tangencial T, diferem pouco entre si e ficam ambas muito abaixo do valor longitudinal L. O resultado, consistente em toda a literatura, é a ordem $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$, com a mesma ordem na tangente de perdas, e uma razão de anisotropia $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ normalmente entre 1.2 e 1.5 para madeiras nobres temperadas e tropicais no intervalo higroscópico.

Os valores absolutos são modestos e dominados pela umidade. Madeira seca em estufa fica próxima de $\epsilon_{ps_r} = 2-3$, aumentando rápida e monotonamente à medida que o teor de umidade cresce, porque cada incremento de água ligada acrescenta dipolos ao inventário polarizável. Essa inclinação é a razão pela qual o teor de umidade, não a espécie, é a maior alavanca sobre a contribuição dielétrica de um suporte, e é tratado na Seção 5. Para o argumento da anisotropia, o ponto essencial é estrutural, não numérico: a direção de maior permissividade é a direção da fibra, e essa direção é estabelecida pelo marceneiro, não pela árvore.

3. MEDIÇÃO: PERMISSIVIDADE E PERDAS AO LONGO DE TRÊS EIXOS

Medimos ϵ_{ps_r} e $\tan \delta$ em corpos de prova de teca usinados segundo cada um dos três eixos anatômicos, de modo que o campo aplicado pela célula de placas paralelas atravessasse, por sua vez, a amostra longitudinal, radial e tangencialmente. Os corpos de prova eram quadrados de 40 mm por 3.0 mm de espessura, com faces planas e paralelas dentro de ± 10 micrômetros, cortados de três peças equatoriais classificadas 5N e selecionadas pelo protocolo principal para que a contaminação magnética não confundisse a leitura dielétrica. Cada conjunto foi condicionado até o equilíbrio em três teores de umidade -- 8, 12 e 16% -- em câmaras de umidade, e sua umidade foi verificada gravimetricamente contra a massa seca em estufa ao final da série.

A célula era um dispositivo de placas paralelas com anel de guarda do tipo descrito anteriormente (Tanaka e Park, 2022), acionado por um analisador de impedância Keysight E4990A de 20 Hz a 10 MHz. O anel de guarda suprime os efeitos de borda para que a capacitância medida corresponda a uma área definida de eletrodo e a permissividade extraída seja o valor em massa do material, não uma estimativa contaminada pelas bordas; a tangente de perdas é lida diretamente como fator de dissipação do dispositivo. O contato foi feito por finas intercamadas de elastômero condutor para acomodar a rugosidade residual das faces usinadas sem um adesivo que contribuísse com sua própria polarização.

A 12% de teor de umidade e 1 kHz, a teca retornou $\epsilon_{ps_L} = 2.64$, $\epsilon_{ps_R} = 2.09$ e $\epsilon_{ps_T} = 2.02$, razão de anisotropia $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ de 1.31 e $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_R}$ de 1.26; os dois eixos transversais concordaram dentro de 4%, como esperado. A tangente de perdas acompanhou a mesma ordem: $\tan \delta$ foi 0.021 ao longo da fibra e 0.014-0.015 transversalmente. Na faixa de áudio de 20 Hz a 20 kHz, as permissividades permaneceram planas dentro de 3%, e a razão de anisotropia ficou entre 1.24 e 1.31. Elevar o teor de umidade para 16% aumentou todos os valores -- ϵ_{ps_L} chegou a 3.08 -- e, notavelmente, ampliou ligeiramente a anisotropia, porque a água ligada adicional se polariza preferencialmente no eixo favorecido. Secar até 8% comprimiu tanto os valores absolutos quanto a razão. Assim, a anisotropia não é uma constante fixa do material, mas modulada pela umidade, mais forte onde menos importa (molhada) e mais fraca onde o material está mais seco; na especificação de fornecimento de 12 $\pm$ 1%, ela é confortavelmente resolvida e estável.

4. O MODELO DE CAPACITÂNCIA DISTRIBUÍDA DO BERÇO, CABO E COLUNA

Para converter três permissividades em uma decisão de projeto, precisamos da geometria do acoplamento. O cabo não fica sobre um bloco plano; repousa em um berço, uma ranhura rasa e arredondada usinada na face superior, de modo que um arco finito da capa do cabo seja separado da madeira apenas pela espessura da parede da capa. A madeira diretamente sob esse arco -- uma curta coluna vertical que vai do fundo do berço ao corpo do bloco -- é onde o campo entre o condutor e qualquer retorno de massa distante é mais intenso e onde se armazena a grande maioria da capacitância cabo-suporte. Madeira mais externa e mais abaixo contribui com peso que cai rapidamente à medida que o campo se espalha e enfraquece.

Modelamos isso como uma capacitância distribuída por unidade de comprimento do percurso, integrando a energia local do campo pelo volume de madeira sob e ao redor do berço, com o tensor de permissividade da madeira inserido eixo por eixo. A construção é padrão para um dielétrico anisotrópico: o componente vertical do campo amostra a permissividade do eixo vertical, os componentes horizontais amostram as permissividades dos eixos horizontais; como o berço concentra o campo na região quase vertical logo abaixo do condutor enquanto os caminhos de retorno que fecham a capacitância correm para fora e para baixo pelos flancos da coluna, as permissividades horizontais carregam a maior parcela da energia armazenada. A saída do modelo é uma única cifra de interesse de engenharia: a capacitância que o bloco acrescenta ao cabo, em picofarads por bloco, como função da orientação do tensor de permissividade.

Duas orientações são de interesse prático. A fresagem com o topo do veio na vertical coloca o eixo longitudinal L na vertical, pelo caminho de carga, e deixa os dois eixos transversais baixos R e T no plano horizontal. A fresagem pela face (corte tangencial, fibras horizontais) deita o eixo longitudinal L no plano horizontal, onde é amostrado pelos fortes componentes horizontais do campo, e levanta um eixo transversal na vertical. Inserir as constantes medidas a 12% no modelo para uma geometria representativa do berço (cabo de 12 mm de diâmetro, berço arredondado de 3 mm, bloco de 60 mm de altura, retorno de massa nominal à distância do chassi) produz cerca de 1.9 pF por bloco na orientação de topo e cerca de 2.3 pF por bloco na orientação



de face -- diferença próxima de 0.4 pF, cerca de 18%, decorrente apenas do ângulo de corte. Por bloco, é pequena. Também é real, repetível, de sinal único e gratuita: custa ao fabricante somente a decisão de orientar corretamente a peça e se acumula pelos vários blocos de um percurso completo.

5. VARREDURA DO ÂNGULO DA FIBRA E SENSIBILIDADE À UMIDADE

As duas orientações nomeadas são os extremos de um contínuo, e vale confirmar que o topo do veio é um mínimo verdadeiro, não apenas a melhor de duas escolhas arbitrárias. Usinamos uma série de corpos de prova em ângulos de fibra de 0 deg (fibra vertical, verdadeiro topo do veio), passando por 30, 45 e 60, até 90 deg (fibra horizontal, face longitudinal) em relação ao eixo de carga, e medimos cada um na geometria do modelo do berço com um condutor energizado acima. A capacitância referida ao cabo subiu monotonamente com o ângulo da fibra, do mínimo de topo em 0 deg ao máximo de face em 90 deg, acompanhando de perto a ponderação pelo cosseno ao quadrado prevista pelo modelo tensorial à medida que o eixo longitudinal de alta permissividade gira progressivamente para dentro do campo horizontal. A curva é rasa perto de 0 deg -- poucos graus de erro de fresagem custam quase nada -- e mais íngreme no meio da varredura, portanto a penalidade por um corte realmente descuidado é maior do que por um corte imperfeito, porém bem-intencionado. O mínimo está no verdadeiro topo do veio e é um mínimo, não uma inflexão.

O teor de umidade desloca toda a curva verticalmente sem mover a localização do mínimo. Como a permissividade sobe rapidamente com a água ligada, um bloco que passou de 12 para 16% de umidade acrescenta mais capacitância em termos absolutos do que toda a diferença entre topo e face em umidade fixa -- a alavanca da umidade é maior do que a da orientação. Mas as duas são independentes: molhar a madeira eleva o piso, não altera qual orientação é mais baixa. Orientação e condicionamento são, portanto, controles complementares, e ambos devem ser exercidos. Essa é a base medida para secar em estufa cada peça classificada na origem até 12 +/- 1% e para a verificação anual de umidade no cronograma de manutenção: a orientação é usinada de forma permanente e não pode derivar, mas a umidade que a escala pode, e um suporte deixado em equilíbrio com uma sala úmida cede lentamente a margem obtida na bancada de usinagem.

Observamos de passagem que a concordância entre os eixos transversais medida na Seção 3 torna irrelevante, dentro da incerteza de medição, a escolha entre apresentação radial e tangencial no plano horizontal; o bloco pode ser girado em torno do eixo vertical para obter a melhor aparência dos anéis na face superior sem consequência dielétrica, desde que as fibras permaneçam verticais.

6. DISCUSSÃO: DOIS ARGUMENTOS, UMA ORIENTAÇÃO

A orientação de topo não foi adotada por seu comportamento dielétrico. Foi adotada porque o topo do veio é a forma mais rígida e resistente de carregar madeira em compressão: com as fibras na vertical, uma carga descendente é sustentada ao longo das células tubulares em sua direção mais forte, e o bloco resiste ao peso estático de um percurso de cabos e ao assentamento da instalação com a menor fluência e a menor alteração dimensional. Esse é um princípio antigo e incontroverso da engenharia de madeira, e fixou a especificação de fresagem antes que qualquer permissividade fosse medida.

As medições dielétricas relatadas aqui foram feitas depois e poderiam, em princípio, ter discordado da escolha mecânica -- o eixo ao longo da fibra poderia ter sido o de baixa permissividade, caso em que colocá-lo na vertical teria sido mecanicamente correto e eletricamente errado, forçando uma conciliação. Não discordaram. O eixo ao longo da fibra é o de alta permissividade, por isso colocá-lo na vertical o remove do plano horizontal onde o campo do cabo é mais intenso, exatamente o que o modelo de capacitância pede. A orientação mecanicamente ideal é, de modo independente, a mais silenciosa dielectricamente. Os dois argumentos foram construídos a partir de físicas diferentes, em momentos diferentes, por pessoas resolvendo problemas diferentes, e selecionam o mesmo corte.

Não atribuímos peso místico a essa concordância; materiais anisotrópicos frequentemente têm o eixo rígido e o de alta permissividade alinhados, porque ambas as propriedades remontam à mesma microestrutura alinhada, e a teca é um desses materiais. Mas a consequência prática permanece. Um fabricante que siga apenas o argumento mecânico chega ao topo do veio e, sem pretender, também minimiza o acoplamento capacitivo. Um fabricante que sobreponha o argumento mecânico em favor de uma face decorativa perde nas duas contas ao mesmo tempo. A convergência não é tanto uma coincidência a admirar quanto uma razão para confiar na especificação: quando duas linhas independentes de raciocínio terminam no mesmo número, é mais provável que o número esteja certo.

7. CONCLUSÃO

A madeira é um corpo dielectricamente anisotrópico, e um suporte de cabo de madeira é esse corpo mantido no campo próximo de um condutor. Sua contribuição à instalação é uma pequena capacitância distribuída cuja magnitude o fabricante estabelece, consciente ou não, na bancada de usinagem. Medimos a permissividade e as perdas nos três eixos da teca equatorial, confirmamos a ordem esperada $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ com razão de anisotropia próxima de 1.3 no teor de umidade de fornecimento e levamos essas constantes por um modelo de capacitância de berço e coluna até um indicador -- picofarads por bloco -- que difere de modo mensurável entre fresagem de topo e de face. O topo do veio é o menor dos dois, por cerca de 0.4 pF e 18% em uma geometria representativa, e uma varredura do ângulo da fibra o confirma como mínimo verdadeiro.



A margem é pequena por bloco, e recusamo-nos a exagerá-la. Afirmamos apenas que é real, que possui direção preferida e que a direção preferida já é especificada por razões mecânicas. O Equatorial Elevation Block é fresado com o topo do veio na vertical porque esse é o modo mais rígido de sustentar uma carga compressiva; a análise dielétrica relatada aqui foi empreendida depois e confirma que o mesmo corte também é o mais silencioso dieletricamente. Cada bloco é fornecido com o topo do veio para cima, seco em estufa a 12 +/- 1%, sem acabamento, com seu grau e suas constantes medidas no certificado. Convidamos o leitor a perguntar a qualquer outro fabricante de suportes de madeira em que direção corre sua fibra e por quê.

REFERÊNCIAS

- [1] James, W. L. (1975). Propriedades dielétricas da madeira e de chapas duras: variação com temperatura, frequência, teor de umidade e orientação da fibra. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Propriedades dielétricas da madeira e de materiais à base de madeira. Springer-Verlag, Berlim.
- [3] Skaar, C. (1988). Relações entre madeira e água. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlim.
- [4] Norimoto, M. (1976). Propriedades dielétricas da madeira. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Classificação da neutralidade magnética da madeira estrutural: uma classificação de pureza em graus N para materiais de suporte de áudio. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Medição de permissividade por placas paralelas com anel de guarda em sólidos anisotrópicos de baixa perda. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.